

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojářské metrologie

**Charakteristika 2D a 3D drsnosti povrchů po obrábění WEDM u
oceli EN 1.4301**

2D and 3D Characterization of Surface Roughness of Steel EN 1.4301

Machined by WEDM

Študent:

Miroslav Motúz

Vedúci bakalárskej práce:

Ing. František Špalek

Ostrava 2019

Zadání bakalářské práce

Student: **Miroslav Motúz**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: Charakteristika 2D a 3D drsnosti povrchů po obrábění WEDM u oceli EN 1.4301
2D and 3D Characterization of Surface Roughness of Steel EN 1.4301
Machined by WEDM
Jazyk vypracování: slovenština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Charakterizování drsnosti povrchu technologie WEDM.
3. Návrh a experimentální část.
4. Závěrečné zhodnocení a doporučení.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text* [CD-ROM]. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011. ISBN 978-80-248-2533-5.
SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
HOCHENG, Hong a Hung-Yin TSAI. *Advanced analysis of nontraditional machining*. New York: Springer, c2013, vii, 500 s. ISBN 978-1-4614-4053-6.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. František Špalek**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som celú bakalársku prácu, vrátane príloh vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

V Ostrave13.5.2019.....

.....

Podpis študenta

Prehlasujem, že:

- Bol som zoznámený s tým, že na moju diplomovú prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Zb. – autorský zákon, najmä § 35 – užívanie diela v rámci občianskych a náboženských obradov, v rámci školných predstavení a užívanie diela školného a § 60 – školné dielo.
- Beriem na vedomie, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej len VŠB-TUO) má právo nezárobkovo ku svojej vnútornej potrebe bakalársku prácu použiť (§ 35 odst. 3).
- Súhlasím s tým, že údaje o diplomovej práci budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.
- Bolo zjednané, že s VŠB-TUO, v prípade záujmu z jej strany, uzavrú licenčnú zmluvu s oprávnením použiť dielo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bolo zjednané, že použiť svoje dielo – diplomovú prácu alebo poskytnúť licenciu k jej využitiu môžem len so súhlasom VŠB-TUO, ktorá je oprávnená v takom prípade od mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB-TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do ich skutočnej výšky).
- Beriem na vedomie, že odovzdaním svojej práce súhlasím so zverejnením svojej práce podľa zákona č. 111/1998 Zb., o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších predpisoch, bez ohľadu na výsledok jej obhajoby.

V Ostrave 13.5.2019

.....


Podpis študenta

ANOTÁCIA BAKALÁRSKEJ PRÁCE

MOTÚZ, M. *Charakteristika 2D a 3D drsnosti povrchov po obrábání WEDM u ocele EN 1.4301: bakalárska práca*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2019, 42s. Vedúci práce: Špalek F.

Bakalárska práca popisuje teoretické poznatky nekonvenčnej technológie obrábania pomocou elektroerózie, popisuje základné rozdelenia drsností povrchov podľa normy ČSN EN ISO 4287 a realizáciu experimentu. Experiment sa zameriaval na meranie 2D a 3D drsnosti protikusov perodrážky z ocele EN 1.3401 s výškami 25, 15 a 10 mm. 2D drsnosť bola nameraná drsnomerom Mitutoyo Surftest SJ-400, 3D drsnosť sa zistila pomocou optického mikroskopu Alicona InfiniteFosus G5. Namerané hodnoty sa porovnávali s predpísanými hodnotami, ktoré určuje norma ČSN 02 2507. Ďalej sa namerané hodnoty štatistiky spracovali. Zo štatisticky spracovaných údajov sa spravili grafické vyhodnotenia, kde sa porovnávala závislosť drsnosti Ra a Rz na výške vzorky a na mieste merania vzorky.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

MOTÚZ, M. *2D and 3D Characterization of Surface Roughness of Steel EN 1.4301 Machined by WEDM: bachelor thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, assembly and engineering metrology, 2019, 42p. Thesis head: Špalek F.

The bachelor thesis describes theoretical knowledge of unconventional machining technology using electroerosion, describes basic surface roughness distributions according to ČSN EN ISO 4287 and realization of the experiment. The experiment was focused on measuring the 2D and 3D roughness of the mating grooves of EN 1.3401 with heights of 25, 15 and 10 mm. 2D roughness was measured with a Mitutoyo Surftest SJ-400 roughness gauge, 3D roughness was detected with an Alicona InfiniteFosus G5 optical microscope. The measured values were compared with the prescribed values determined by the ČSN 02 2507 standard. Next, the measured values of the statistics were processed. From the statistically processed data, graphical evaluations were made, where the roughness dependence of Ra and Rz was compared on the sample height and the sample measurement site.

Obsah

Zoznam použitých značiek a symbolov

Úvod.....	1
1. Rozbor nekonvenčných metód obrábania	2
1.1. Elektroerozívne obrábanie.....	3
1.1.1. Fyzikálny princíp EDM.....	6
1.1.2. Pracovné kvapaliny	7
1.1.3. Nástrojové elektródy	9
1.1.4. Charakter povrchu vytvorený metódou EDM	11
1.1.5. Mechanické vlastnosti dosiahnuté elektroerozívnym obrábaním.....	13
1.1.6. Strojové zariadenia	14
1.1.7. Elektroerozívne rezanie drôtom	15
1.2. Parametre drsnosti povrchu	18
2. Návrh a realizácia experimentu	21
2.1. Návrh experimentu.....	22
2.1.1. Rozbor ocele EN 1.4301.....	22
2.1.2. Použitá technológia na výrobu perodrážky	23
2.1.3. Drsnomer Mitutoyo Surftest SJ-400.....	24
2.1.4. Optický 3D mikroskop Alicona InfiniteFocus G5	25
2.2. Realizácia experimentu	26
2.2.1. Meranie 2D drsnosti	26
2.2.2. Meranie 3D drsnosti	29
3. Spracovanie dát z experimentálnej časti práce	32
3.1. Namerané hodnoty 2D drsnosti.....	32
3.2. Namerané hodnoty 3D drsnosti.....	34

3.3. Vyhodnotenie výsledkov.....	35
3.3.1. Namerané maximálne hodnoty Ra, Rz.....	35
3.3.2. Štatistické spracovanie nameraných hodnôt.....	35
4. Záver	42

Použitá literatúra

Zoznam príloh

Zoznam použitých značiek a symbolov

2D	–	dvojmerný	[–]
3D	–	trojmerný	[–]
CNC	–	počítačovo číselne riadený	[–]
\bar{D}	–	aritmetický priemer	[mm]
EDG	–	elektroerozívne brúsenie	[–]
EDM	–	elektroerozívne obrábanie	[–]
HRC	–	tvrdosť podľa Rockwella typu C	[HRC]
h	–	vlhkosť vzduchu	[%]
MS	–	Microsoft	[–]
NC	–	číslícovo riadený	[–]
NMO	–	nekonvenčná metóda obrábania	[–]
p	–	tlak	[kPa]
Ra	–	priemerná aritmetická odchýlka profilu	[μm]
Rm	–	medza pevnosti materiálu	[MPa]
Rp	–	najväčšia výška profilu	[μm]
Rv	–	najväčšia hĺbka profilu	[μm]
Rz	–	najväčšia výška nerovností profilu	[μm]
SiC	–	karbid kremíku	[–]
Si ₃ N ₄	–	nitrid kremičitý	[–]
SK	–	spekaný karbid	[–]
$S_{(D)}$	–	výberová smerodtná odchýlka	[μm]
$S_{(\bar{D})}$	–	smerodtná odchýlka pre rozptyl	[μm]
T	–	teplota	[°C]

t	—	teplota	[°C]
TiN	—	titannitrid	[—]
u_a	—	neistota merania typu A	[μm]
WEDM	—	elektroiskrové rezanie drôtom	[—]
WoCu	—	volfrámová meď	[—]
ZrB ₂	—	diborid zirkónia	[—]

Úvod

V roku 1768 si fyzik Joseph Priestley ako prvý všimol jav elektroerózie a zaznamenal krátery vznikajúce v dôsledku elektrických výbojov na plochách ležiacich oproti vodivým elektródam. Tento jav bol v praxi využitý omnoho neskôr, asi v rokoch 1938 až 1944 sovietskymi inžiniermi Lazarenkovovcami pri obrábaní elektricky vodivých telies, keď postupné vtlačanie elektródy (nástroja) do obrábanej súčiastky v dôsledku elektroerózie kopírovalo tvar nástroja. ²

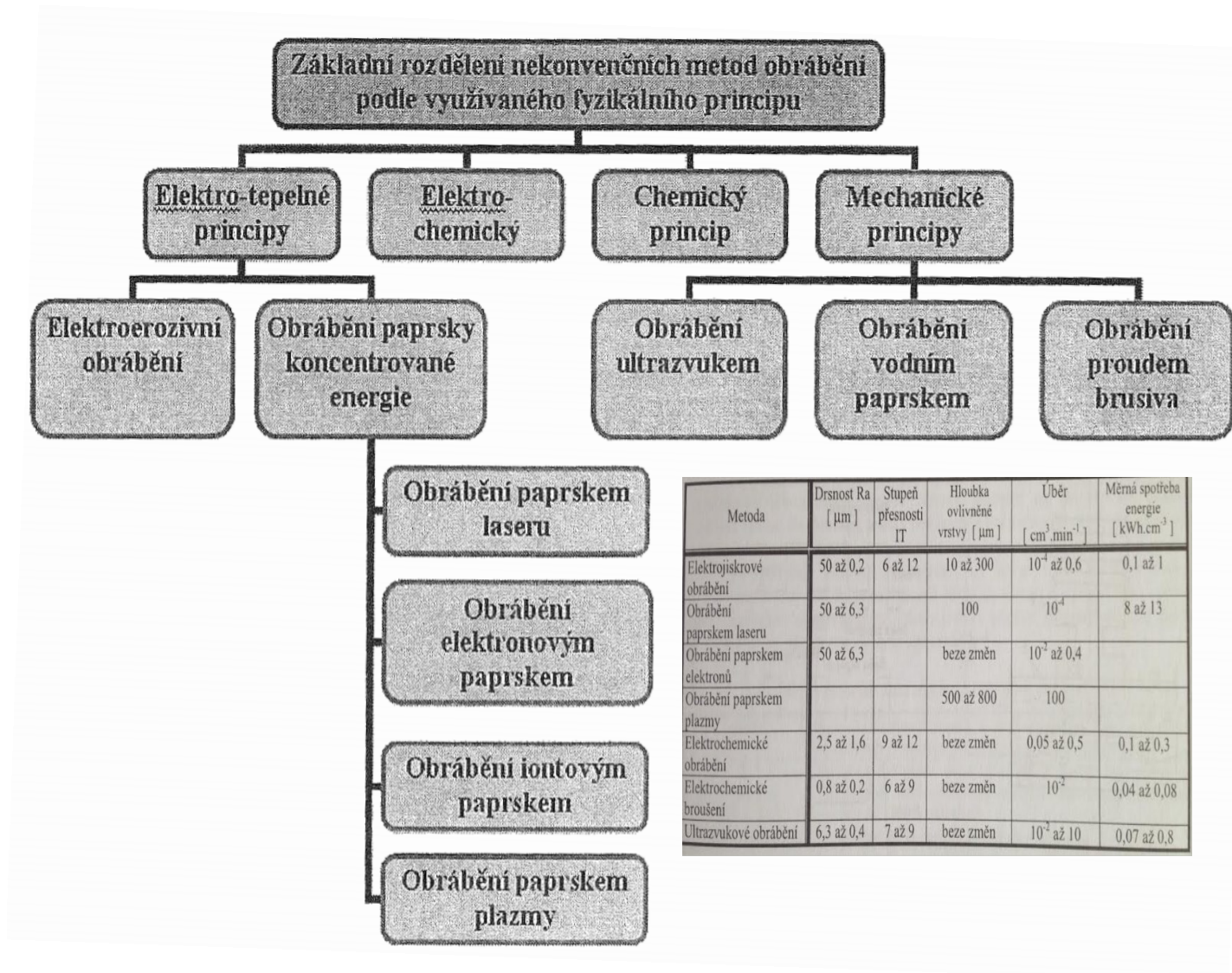
Začiatok priemyselného využitia metódy sa udáva v rokoch 1950 až 1954, kedy sa na výstavách objavili aj prvé elektroiskrové obrábacie stroje. ²

Bakalárska práca sa zameriava na meranie drsnosti protikusu perodrážky v 2D a 3D priestore po použití technológie WEDM, a následné porovnanie nameraných výsledkov s normou ČSN 02 2507, ktorá predpisuje hodnoty drsnosti na plochách drážky pre pero. Ďalším cieľom práce je zistiť správanie sa drsnosti Ra a Rz pri rastúcej výške vzoriek a stálych pracovných parametroch.

1. Rozbor nekonvenčných metód obrábania

Pod pojmom nekonvenčné metódy obrábania sa dajú predstaviť metódy obrábania, ktoré sa od klasického trieskového obrábania líšia hlavne tým, že nepoužívajú mechanickú prácu pre úber materiálu.

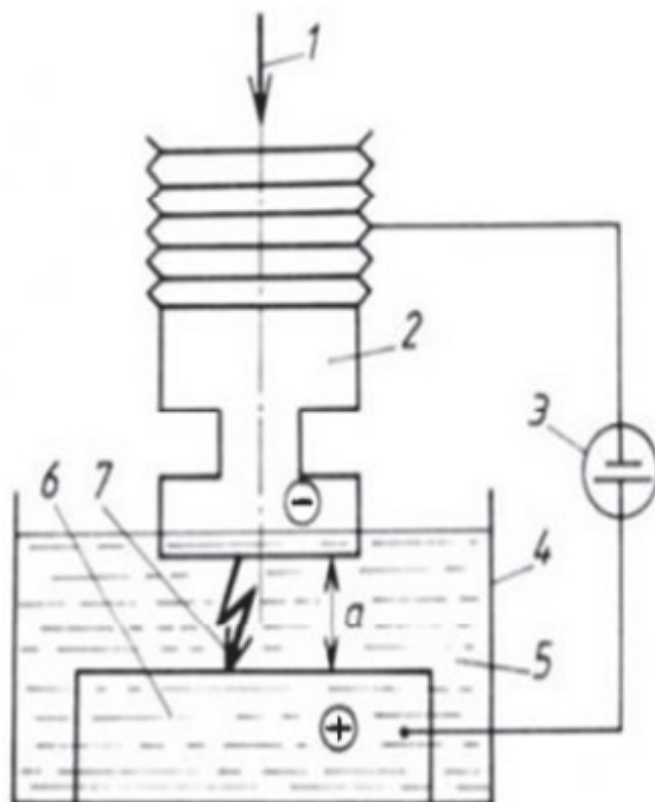
Pri klasickom spôsobe trieskového obrábania je obrobiteľnosť materiálu obmedzovaná mechanickými vlastnosťami ako sú pevnosť alebo tvrdosť. Pri nekonvenčných metódach obrábania tomu tak nie je. Tu obrobiteľnosť závisí najmä na fyzikálnych vlastnostiach materiálu (tepelná vodivosť, elektrická vodivosť, teplota tavenia, elektroerozívna odolnosť a pod.) a jeho chemickom zložení. Táto skutočnosť je obrovskou výhodou týchto metód. Preto sa využívajú pre obrábanie ťažkoobrobiteľných materiálov, ktoré sa dajú veľmi náročne alebo nejdú vôbec obrobit konvenčným spôsobom. ¹



Obr. 1 – Rozdelenie nekonvenčných metód obrábania podľa fyzikálneho princípu a technologické parametre vybraných NMO ^{1,8}

1.1. Elektroerozívne obrábanie

Skrátene EDM z anglického výrazu Electro – Discharge Maschining. Základom tohto elektroretnického spôsobu úberu materiálu je fyzikálny jav označovaný ako elektroerózia. Úber materiálu vzniká pri obrábaní elektrotermickými metódami ako dôsledok elektrických výbojov medzi elektródami ponorenými v kvapalnom dielektriku, ako zobrazuje obrázok 2. ²



Obr. 2 – Fyzikálny proces odberu materiálu elektrickým výbojom ⁸

Kde:

- 1 – Posuv nástrojovej elektródy,
- 2 – nástrojová elektróda,
- 3 – generátor,
- 4 – pracovná vaňa,
- 5 – pracovná kvapalina (dielektrikum),
- 6 – obrobok,
- 7 – elektrický výboj,
- a – pracovná medzera.

Erózia pomocou elektriny je jav, ktorý sa využíva na obrábanie povrchov elektrovodivých materiálov, najmä kovov. Tento jav vzniká dvojakým spôsobom, kontaktným spôsobom a bezkontaktným spôsobom. ²

V prípade kontaktného spôsobu sa používa termín elektrokontaktný spôsob. Aby došlo k elektrokontaktnému spôsobu, očakáva sa kovový styk medzi elektródou a súčiastkou. Za predpokladu, že k styku dôjde a je dostatočná prúdová hustota, dochádza k ohrevu, a materiál sa natavuje a vyparuje, tým sa styk preruší. Pri prerušení vzniká elektrický výboj. Pri tejto metóde sa obvykle oba povrchy vzájomne pohybujú. ²

Bezkontaktný spôsob obrábania sa nazýva elektroiskrové obrábanie. Tu elektrický náboj vznikne prierazom pracovnej kvapaliny, dielektrika, v medzere medzi súčiastkou a elektródou, v prípade dosiahnutia napätia na iskrišti prierazných hodnôt. ²

Podľa druhu výboja, parametrov obrábania a zdrojov impulzného toku rozdeľujeme elektroerozívne obrábanie na:

- elektroiskrové,
- elektroimpulzné,
- elektrokontaktné,
- anódovo-mechanické.

Z technologického využitia sa elektroerozívne obrábanie delí na:

- hĺbenie alebo tvarové elektroerozívne obrábanie (EDM Sinking),
- drôtové rezanie (WEDM – Wire Electrical Discharge Machining),
- brúsenie (EDG – Electrical Discharge Grinding).

Elektroiskrové obrábanie

Elektroiskrové obrábanie využíva krátke impulzy, vybudzované elektrickým spôsobom a pochádzajú z generátora jednosmerného prúdu. Charakteristickým pre tieto impulzy je, že sú asymetrické. Elektródy tvorí nástroj a obrobok. Na elektródy je privádzaná elektrická energia z generátora. Vedenie elektródy je vyrábané z nevodivého materiálu. Jedná sa o dokončovaciu operáciu. Dosahované hodnoty drsnosti povrchu po elektroiskrovom obrábaní sa rozdeľujú na:

- hrubé opracovanie – $R_a = 6 \mu\text{m}$ a viac, $R_z = 25 \mu\text{m}$,
- normálne opracovanie – $R_a = 6$ až $2 \mu\text{m}$, $R_z = 25$ až $8 \mu\text{m}$,
- jemné opracovanie – $R_a = 2$ až $0,5 \mu\text{m}$, $R_z = 8$ až $2 \mu\text{m}$,
- najjemnejšie opracovanie (leštenie) – $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ a menej, $R_z = 2 \mu\text{m}$.

Dosahovaná presnosť plôch po elektroiskrovom obrábaní je pre vonkajšie plochy v rozmedzí 0,02 až 0,05 mm. Presnosť pri obrábaní dutín je 0,1 mm.²

Použitie:

- hĺbenie malých otvorov (od 0,02 mm),
- hĺbenie tvarových otvorov
- výroba zápustiek
- výroba lisovacích nástrojov
- odstraňovanie zalomených nástrojov z dier (vyiskrovaním)

Elektroimpulzné obrábanie

Podstata elektroimpulzného obrábania je podobná ako pri elektroiskrovom obrábaní. Tu sa však využíva oblúkový výboj vhodného tvaru a časového priebehu. Nástrojová elektróda je zapojená na kladný pól a obrobok na záporný pól. Elektrokontaktným obrábaním sa dosahujú vyššie úbery materiálu, až $25\,000\text{ mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$, pričom kvalita povrchu a jeho presnosť klesá.²

V porovnaní s elektroiskrovou metódou má zväčšený úber materiálu 6 až 10-krát, opotrebovanie nástrojovej elektródy klesá 3 až 5-krát a spotreba energie je redukovaná 2 až 3-krát. Tieto vlastnosti ovplyvňuje veľkosť prúdu, v rozsahu 80 až 360 A, a veľkosť napätia, v rozsahu 2,5 až 25 V.²

Pri pôsobení frekvencie v rozsahu 1000 až $7\cdot 10^4$ Hz je používané na dokončovacie operácie. Tento rozsah frekvencií zaručuje vznik hladkých plôch s drsnosťou $R_a = 6,3$ až $0,8\text{ }\mu\text{m}$. Intenzita úberu materiálu však podstatne klesá.²

Elektrokontaktné obrábanie

Pre elektrokontaktné obrábanie je typické odporové odtavovanie materiálu. Úber materiálu dosahuje až $3\,000\text{ mm}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Dochádza k styku medzi obrobkom a nástrojovej elektródy. Tento spôsob obrábania je vhodný na hrubovacie operácie, rezanie veľkých priemerov z ťažko obrobiteľných zliatin, kvôli tepelnému ovplyvneniu. Teplo ktoré vzniká pri elektrokontaktnom obrábaní nesie aj riziko zvarenia elektród medzi sebou.²

Výhody:

- Vysoká produktivita
- Možné obrábanie na vzduchu
- Nízke opotrebenie nástroja
- Pracovný stroj je cenovo nenáročný a jednoduchý²

Nevýhody:

- obrobený povrch dosahuje nízku kvalitu,
- hlboké tepelné ovplyvnenie povrchu (až do 5 mm),
- hluk,
- vznik ultrafialového žiarenia
- návary ²

Anódovo-mechanické obrábanie

Táto metóda je prechodná medzi elektroerozívnym a elektrochemickým obrábaním. Jej princípom je úber materiálu, ktorý spôsobujú krátkodobé výboje (iskry). Obrábanie je vykonávané pri vysokých teplotách, ktoré vytvára elektrický výboj. Tieto teploty kov roztavujú. Roztopený kov je potom odstraňovaný z miesta rezu pomocou nástroja, ktorý vykonáva rotačný pohyb. Ako nástroj sa používa oceľový kotúč, poprípade pas alebo drôt. Nástroj je pripojený na katódu, obrobok na anódu. ²

Používa sa na rezanie materiálov, ktoré sú náročné na obrábanie, na tepelne spracované materiály, ostrenie nástrojov zo spekaných karbidov, tvarové vyrezávanie a podobne. ²

1.1.1. Fyzikálny princíp EDM

Elektrická erózia vzniká pôsobením výbojov v miestach na povrchu elektród. Výboj je vodič elektrického prúdu v plyne. Nosnými elementmi prúdu sú elektricky nabité častice, elektróny a ióny vznikajúce ako produkt ionizácie plynu medzi katódou a anódou i výronom z kryštálovej mriežky obidvoch elektród, elektrónov z katódy a iónov z anódy. Nabité častice získavajú v elektrickom poli pohybovú energiu, ktorá sa spolu s výstupnou prácou odovzdáva povrchu elektród. Tak dochádza k premene elektrickej energie na energiu tepelnú vo výboji. ²

V zasiahnutom mieste na povrchu obrobku sa materiál prudko ohrieva, taví a čiastočne odparuje. Roztavený kov sa z miesta zásahu vymršťuje tlakom kovových pár. Takto vzniká kráter, ktorého rozmery závisia od parametrov režimu a od obrábaného materiálu. Výboje sa opakujú s určitou frekvenciou. Vznikajúce krátery sa postupne prekrývajú, až je obrobená celá plocha. Pri vzniku výboja medzi dvoma elektródami môžu nastať tri prípady:

- výboj vo veľmi riedkom plyne,
- výboj vo vzduchu alebo v plyne pri normálnej teplote a tlaku,
- výboj v dielektrickej kvapaline. ²

Elektrické výboje v plyne alebo vo vzduchu nemajú veľkú účinnosť na elektródy, aby mohli byť použité pri odoberaní materiálu. Použitím dielektrickej kvapaliny sa proces uprostred elektród stáva zložitejší a vznikajú ďalšie nové faktory.²

Jedným z dôležitých faktorov je priestorová hustota výboja. Tá je príčinou tvorby malých dutín na povrchu elektród, kde ich objem, priemer aj hĺbka zodpovedajú veľkosti výboja.²

Polarita výboja je ďalší dôležitý faktor, pretože rozrušovanie takýmto výbojom nie je na elektródach rovnaké, na anóde je väčšie ako na katóde. Polarita nie je stála, ale premenlivá a je závislá od viacerých faktorov. Proces obrábania prebieha dvoma elektródami, pričom je celý proces ponorený do pracovného média. Toto médium tvorí dielektrikum. Dielektrikum je kvapalina, ktorá sa vyznačuje vysokým elektrickým odporom. Výboj vzniknutý medzi elektródami je zapríčinený prívodom napätia na pracovné elektródy. Veľkosť privedeného napätia je závislé na:

- vzdialenosť medzi elektródami,
- vodivosť dielektrika,
- veľkosť znečistenia dielektrika.²

Ideálna vzdialenosť medzi elektródami je daná pracovnými podmienkami, druhom dielektrika a materiálom elektród. V mieste kde je elektrické napäťové pole najsilnejšie, vzniká výboj. Pôsobenie takéhoto poľa má vplyv na pohyb voľných kladných a záporných iónov, vďaka čomu postupne zrýchľujú až nadobudnú vysokú rýchlosť. To zapríčiňuje vznik vodivého, ionizovaného, kanála. Vtedy začína pretekať prúd medzi elektródami, vzniká výboj a ten spôsobuje ďalšie zrážky jednotlivých častíc, až vznikne tzv. plazmové pásmo, kde teplota dosahuje 3 000 až 12 000°C. Takáto vysoká teplota privádza materiál elektród k taveniu, ba dokonca až k odparovaniu.²

1.1.2. Pracovné kvapaliny

Ako pracovné kvapaliny sa používajú elektricky nevodivé dielektriká. Medzi najčastejšie používané patrí technický petrolej, transformovaný olej, zmes petroleja a oleja, destilovaná a deionizovaná voda a vodné sklo.²

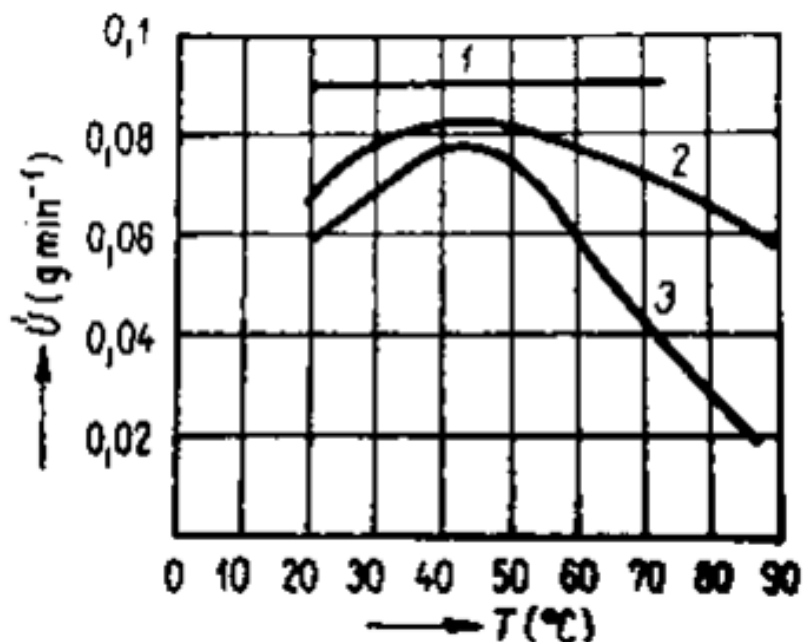
Pracovná kvapalina musí spĺňať nasledovné funkcie:

- chladiť elektródy,
- odstraňovať splodiny elektroerozívneho úberu,
- mať malú viskozitu a zmäčavosť, aby sa rýchlo obnovovala izolácia po výboji,
- byť chemicky neutrálna kvôli zamedzeniu korózie,

- mať dostatočne vysokú teplotu horenia, aby nedošlo k vznieteniu,
- pomocou tvorby vodivých mostíkov zabezpečovať elektrický prieraz na vhodnú vzdialenosť elektród (0,001 – 0,1 mm), aby prechod prúdu medzi obidvoma elektródami vyústil do výboja,
- musí byť stála, nenáročná na výrobu a lacná,
- spĺňať hygienické a ekologické požiadavky. ³

Takmer všetky tieto vlastnosti spĺňujú ľahké strojové alebo transformátorové oleje, najmä obyčajný priemyselný petrolej. Pracovná teplota dielektrickej kvapaliny sa pri elektroerozívnom obrábaní pohybuje od 60°C až do 80°C. ³

Na obrázku 3 je znázornený diagram závislosti úberu kovu od druhu dielektrickej kvapaliny pri rôznej teplote.

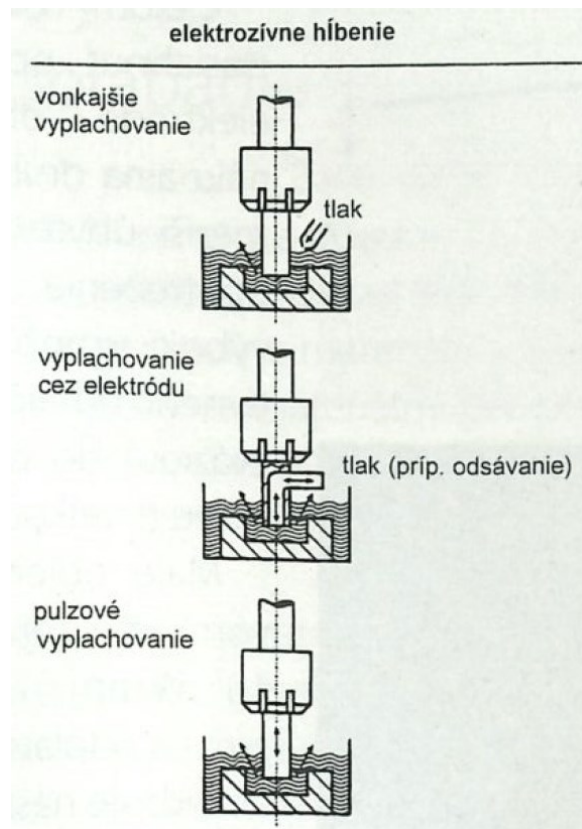


Obr. 3 – Vplyv teploty dielektrika na úber materiálu ³

Kde:

- 1 – priemyselný petrolej,
- 2 – transformátorový olej,
- 3 – strojový olej.

Súčasťou modernejších strojov určených na tento typ technológie je aj agregát na prívod, chladenie a čistenie dielektrika. Pre vyplachovanie existuje rad konštrukčných prevedení, vid' obrázok 4. ⁴



Obr. 4 – Spôsoby vyplachovania pri elektroerozívnom hĺbení ⁴

- **vonkajšie vyplachovanie** – najčastejšia metóda vyplachovania. Počas obrábania hlbších dutín je nutné kombinovať s pulzujúcim vyplachovaním ⁴
- **tlakové vnútorné vyplachovanie** – dielektrikum je privádzané nástrojom (s otvorom) priamo do pracovného priestoru. Týmto spôsobom vyplachovania sa zhoršuje tvarová presnosť na bočných plochách, kvôli odvádzaným časticiam, ktoré spôsobujú bočné výboje ⁴
- **vyplachovanie odsávaním** – dosiahnutie tvarovej presnosti na veľmi dobrej úrovni⁴
- **pulzujúce vyplachovanie** – tento spôsob sa vykonáva odd'ľovaním elektródy. Pri vychádzaní sa pracovný prúd vypína a do pracovného priestoru je privádzané dielektrikum ⁴

1.1.3. Nástrojové elektródy

Nástrojové elektródy sa skladajú z pracovnej časti, ktorá sa zúčastňuje obrábania, z pomocných elementov, potrebných na fixáciu polohy a upevnenie elektródy, zo spojenia na rozhraní pracovnej a pomocnej časti.²

Pracovná časť sa vyrába z erozívne odolného materiálu. Pomocné časti môžu byť buď z totožného materiálu alebo z materiálu cenovo výhodnejšieho a viac vyhovujúceho danej potrebe obrábania. Kvalitatívne vhodnými materiálmi pre pracovnú časť sú **hliník, meď a volfrám, sivá liatina, grafitové zliatiny**. Najlepšie výsledky vykazujú elektródy

s pracovnou časťou z medi. Med' sa rovnako používa aj ako etalónový materiál pri hodnotení a ohodnocovaní elektroerozívnych zariadení.²

- **Hliníkové elektródy** – majú využitie pri predbežnom opracovaní dier bez veľkých prechodov osadení v súčiastkách z ocele a spekaných karbidov.²
- **Mosadz** – opotrebovanie je rýchlejšie ako u medi. Využíva sa na hĺbenie úzkych otvorov a na vŕtanie, kde opotrebovanie výrazne neovplyvňuje presnosť karbidov.²
- **Zliatiny z medi** – používajú sa pri obrábaní súčiastok z veľmi tvrdých ocelí, pretože sú dobre obrobitel'né technológiou WEDM.²
- **Elektródy zo sivej liatiny** – používajú sa na obrábanie spekaného karbidu, kde sa využíva otáčajúca sa elektróda.²
- **Elektródy z volfrámu** – sú vysoko trvanlivé, no ich veľká pevnosť a taktiež zlá obrobitel'nosť im nedovoľuje široké použitie pri výrobe zložitejších tvarov nástrojov. Používajú sa drôty pri pretlačovaní malých dier do 0,2 mm v oceliach alebo žiarupevných zliatinách a pri rozrezávaní ingotov z rovnakých materiálov.²
- **Med'-volfrám a striebro-volfrámové kompozície** – aplikujú sa na tvorby úzkych drážok a otvorov, poprípade na jemné práce pri zlých podmienkach prúdenia dielektrika. Tieto typy elektród sú finančne veľmi náročné.²
- **Grafitové elektródy** – dnes už často nahrádzajú kovové elektródy. Grafit sa využíva najmä pre jeho dobrú obrobitel'nosť, ale aj vysokú teplotu tavenia (okolo 3 000°C), vysokú trvanlivosť, nižšiu hmotnosť ako med', a odolnosť voči opotrebeniu. Využíva sa pri obrábaní ocelí a na výrobu tvarovo zložitých nástrojov.²

Na obrázku 5 sa uvádzajú odporúčané materiály nástrojových elektród na obrábanie ocelí.

Odporúčané materiály elektród na obrábanie ocelí										
Cu – elektrolytická med', WoCu – volfrámová med', C – grafit										
Veľkosť plochy	Veľmi malá		Malá		Stredná		Veľká		Veľmi veľká	
Veľkosť obrábanej plochy S (mm ²)	<10		10-100		100-104		104-105		>105	
Vonkajší obvod o (mm)	<12		12-40		40-400		400-1 200		>1 200	
Typ práce	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Lisovacie nástroje	WoCu	WoCu	Cu	WoCu	Cu	Cu	C	Cu	C	C
Strižné nástroje	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu
Kokily	WoCu	WoCu	Cu	WoCu	Cu	Cu	C	C	C	C
Formy na sklo a gumu	Cu	WoCu	Cu	Cu	C	Cu	C	C	C	C
Nástroje SK	WoCu	WoCu	Cu	WoCu	Cu	Cu	C	Cu	C	C
Zápustky	C	Cu	C	C (Cu)	C	C	C	C	C	C

Poznámka: 1 – obrábanie nahrubo
2 – obrábanie načisto

Obr. 5 – Odporúčané materiály elektród na obrábanie⁵

1.1.4. Charakter povrchu vytvorený metódou EDM

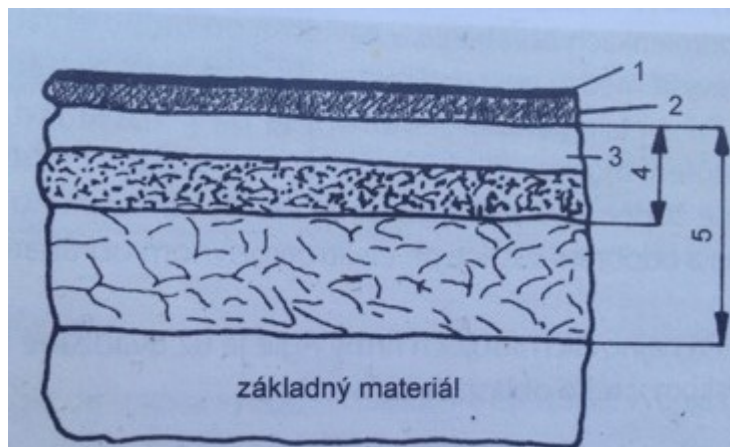
Špecifický povrch mikogeometrie povrchu po elektroiskrovom obrábaní sa odlišuje od povrchov získaných konvenčnými metódami obrábania. Povrch pri elektroiskrovom obrábaní tvoria štatisticky nepravidelné krátery, ktoré vznikajú v dôsledku jednotlivých výbojov. Takto opracovaný povrch bude mať vo všetkých smeroch zhodné charakteristiky drsnosti povrchu. Rozmerová presnosť a parametre kvality povrchu, ktoré sa dosahujú elektroerozívnym obrábaním sú zobrazené na obrázku 6. ⁵

Presnosť rozmerov a kvalitatívne parametre pri elektroerozívnom obrábaní		
Spôsob obrábania	Presnosť rozmerov (mm)	Drsnosť povrchu Ra (μm)
opracovanie na hrubo impulzné zdroje veľká energia výbojov (hlbenie) -	(± 0,02) - (± 0,5)	Ra > 6 μm Rz ~ 25 μm
normálne opracovanie impulzné zdroje	(± 0,01) - (± 0,02)	Ra = 2 - 6 μm Rz = 8 - 25 μm
jemné a veľmi presné obrábanie vysokofrekvenčné zdroje rezanie drôtovou elektródou	(± 0,005) - (± 0,01)	Ra = 0,8 - 2 μm Rz < 6 μm
elektroerozívne leštenie (presné rezanie drôtovou elektródou)	až ± 0,002	Ra = (0,1) ; 0,2 - 0,8 μm Rz < 2,5 - 4 μm

Obr. 6 – Presnosť rozmerov a kvalitatívne parametre pri elektroerozívnom obrábaní ⁵

Drsnosť a stav povrchovej vrstvy sa radí k najdôležitejším technologickým charakteristikám, ktoré ohraničujú použitie obrábanie metódou EDM. Akosť povrchu ovplyvňuje energia jednotlivých výbojov. Táto energia určuje rozmery vzniknutého krátera. Najlepšia akosť povrchu sa dosahuje pri nižších hodnotách prúdu, krátkych impulzoch a vysokých frekvenciách výbojov. Pri takýchto podmienkach, ale dochádza k veľkému opotrebeniu nástrojových elektród. Jednotlivé výboje sú sústredené na malú plochu a merné tepelné zaťaženie takýchto plôch je vysoké. Preto sa materiál v mieste výbojov natavuje a čiastočne vyparuje. Kvapky roztopeného kovu sa vyhadzujú do priestoru medzi elektródami vďaka vzniknutej tlakovej vlne a síl elektromagnetického poľa. Stuhnutý kov v podobe guľiek sa priliepa na hrany kráterov, pričom tieto guľky sú oveľa menšie ako samotné krátery. Preto ovplyvňujú drsnosť povrchu v menšej miere. Mikogeometria obrobeného povrchu je závislá od podmienok obrábania, ktorými sú napríklad tepelno-fyzikálne vlastnosti obrábaného materiálu, rozmery obrábaného povrchu, pracovná kvapalina a podobne. Najvýznamnejším

parametrom sú elektrické parametre elektroerozívneho obrábania. Povrch obrobku je namáhaný chemickými i štrukturálnymi zmenami, pôsobením vysokých teplôt, ale aj vníkaním častíc z dielektrika alebo materiálu nástroja do povrchu obrobku. Vzniká tak „biela vrstva“, ktorá je umiestnená na povrchu obrobku a má rozdielne vlastnosti oproti základnému materiálu, ako je napríklad vyššia tvrdosť, odlišné antikoročné vlastnosti a podobne. Stav povrchovej vrstvy po elektroerozívnom obrábaní je zobrazený na obrázku 7. ⁶



Obr. 7 – Stav povrchovej vrstvy obrobku po elektroerozívnom obrábaní ⁶

Kde:

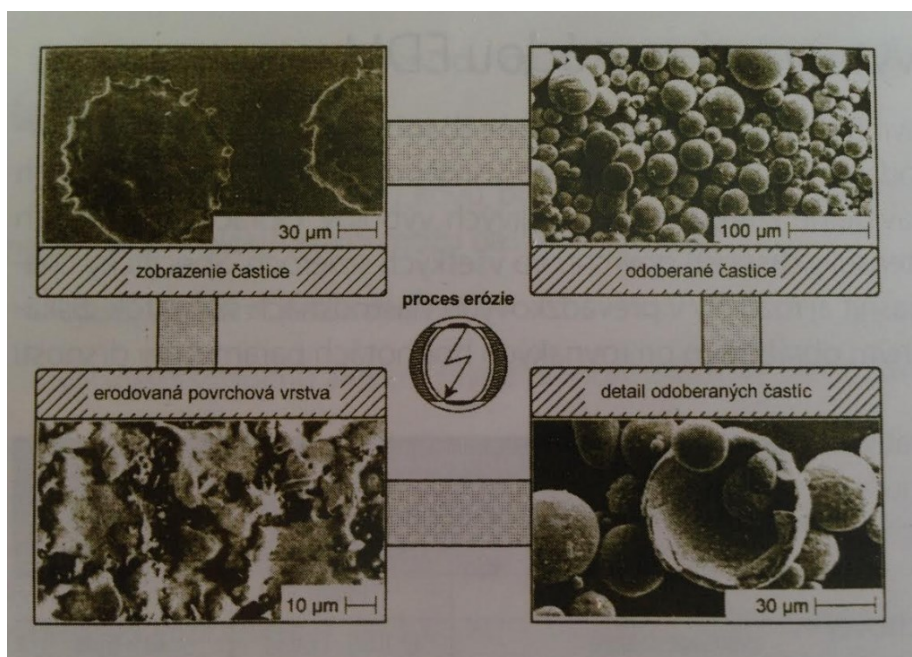
- 1 – mikrovrstva nasýtená časticami dielektrika, chemické zlúčeniny vytvorené difúziou
- 2 – vrstva obsahujúca materiál nástrojovej elektródy (pri zapojení nástroja na záporný pól)
- 3 – biela vrstva silno nauhličená, znovu stuhnutá tavenina, jemná štruktúra charakteru martenzitu, tvrdosť 60 HRC, hrúbka od 0,04 mm až do niekoľkých desiatín milimetra v závislosti od energie impulzov
- 4 – pásmo termického ovplyvnenia, presahujúce rozmerom bielu vrstvu, vykazujúce v oblasti 3 – 4 svojou štruktúrou zakalený a popustený východiskový materiál
- 5 – pásmo plastickej deformácie vyvolané tlakovými rázmi impulzov

Vznik bielej vrstvy spôsobuje rýchle tuhnutie už predtým roztaveného materiálu, ktorý vzájomne účinkoval s pracovnou kvapalinou – dielektrikom. Výskumy tejto vrstvy dokázali aj prítomnosť materiálu nástroja. Obrábaním materiálov, ktoré obsahujú uhlík, sa vyskytuje austenit a produkty jeho premeny v tejto vrstve. Vlastnosti vrstvy sú tak závislé od veľkosti tepelného impulzu, vlastnosti materiálov, východiskovej štruktúry, od fázového zloženia a disperzných fáz, ktorých tvorba je pri sekundárnych procesoch. ⁶

Základ tvorby bielej vrstvy je impulzné pôsobenie tepelnej energie na mikroobjemy povrchu. Vznik je možný aj u elektroerozívneho obrábania. Tu sa tiež vyskytuje impulzné

pôsobenie tepelnej energie. Hrúbka bielej vrstvy je závislá od chemického zloženia ocele, dĺžky impulzu a účinkovania energie výboja. Hrúbka tejto vrstvy dosahuje 3 až 100 μm . S vyšším počtom impulzov sa hĺbka tepelne ovplyvnenej vrstvy znižuje a pri dokončovacom obrábaní ocelí a žiarupevných zliatin je hĺbka v rozsahu 0,01 – 0,03 mm, kde tepelne ovplyvnená má charakter oddelených zón. Vo vrstve na povrchu je možný vznik aj zvyškového napätia. Toto napätie vzniká ako dôsledok tepelného účinku, ktorý prebieha na povrchu. Rast zvyškového napätia je spôsobený zvyšovaním energie impulzov pri stabilnej dĺžke. Parametre impulzov, vlastnosti obrábaného materiálu, fyzikálno-mechanické vlastnosti vytvoreného povrchu určujú veľkosť a hĺbku zvyškových napätí. V určitých prípadoch môže zvyškové napätie prekročiť medzu pevnosti a tým zapríčiniť vznik siete mikrotrhlín. ⁶

„Pri metalografickom skúmaní sa biela vrstva javí ako dokonale homogénna a pri väčšom zväčšení možno vidieť jej laminárny charakter. Pri hrubom ani jemnom opracovaní neboli zistené žiadne kryštalické zmeny štruktúry obrábaného kovu. Na obrázku 8 je zobrazená vrchná plocha a odobraté častice pri elektroerozívnom obrábaní.“ ^{2, 6}



Obr. 8 – Vrchná plocha a odobraté častice pri elektroerozívnom obrábaní ⁶

1.1.5. Mechanické vlastnosti dosiahnuté elektroerozívny obrábaním

Odolnosť voči korózii je v prípade elektroerozívneho obrábania, taktiež ako pri mechanickom obrábaní, závislá najmä od drsnosti povrchu. Platí, že odolnosť voči korózii bude rásť, pri znižujúcej sa drsnosti povrchu. Vplyv na koróznú odolnosť po elektroerozívnom obrábaní môže mať aj svojský charakter mikrogeometrie povrchu a taktiež aj výskyt mikrotrhlín. ⁷

Mechanická pevnosť súčiastky vyrobenej elektroerozívnym obrábaním, je pri pôsobení statického zaťaženia takmer totožná ako mechanická pevnosť dosiahnutá konvenčnými metódami obrábania. Špeciálnym prípadom sú spekané karbidy, kde dochádza k zníženiu ohybovej pevnosti a to aj v prípade dodržania podmienok, ktoré zamedzujú vzniku mikrotrhlín.⁷

Únavová pevnosť je o niečo nižšia v dôsledku prítomnosti zvyškových napätí a taktiež aj pretavenej vrstvy. Výskyt mikrotrhlín vo vrstve na povrchu urýchľuje pokles únavovej pevnosti zhruba o 4-5%, pričom pri odstránení celej ovplyvnenej vrstvy sa obnoví únavová pevnosť na 95% pôvodnej hodnoty.⁷

Odolnosť povrchov voči opotrebeniu po elektroerozívnom obrábaní sa v porovnaní s povrchmi, ktoré vznikli konvenčnými metódami obrábania, môže výrazne zvýšiť. V prípade povrchov súčiastok, kde dochádza v prevádzke k treniu sa vyššia odolnosť voči opotrebeniu dá vysvetliť charakterom mikrogeometrie obrobeného povrchu. Ten pomáha k lepšiemu vytrvaniu olejového filmu. Odolnosti voči opotrebeniu tohto typu súčiastok pomáha aj prítomnosť bielej vrstvy. Tá sa vyznačuje tvrdosťou, a tým aj oteruvdornosťou.⁷

1.1.6. Strojové zariadenia

Stroje využívané pri elektroerozívnom obrábaní možno rozdeliť do dvoch kategórií a to na:

- Stroje na opracovanie povrchov tvarovou elektródou (EDM),
- Stroje na rezanie drôtom (WEDM).²

Stroje EDM sa používajú v dvoch konštrukčných prevedeniach – stojanové, portálové. Proces obrábania je riadený CNC riadením. CNC riadenie je umožnené v štyroch osiach. Možnosť nastavenia prísuvu nástoja a nastavenie čelnej pracovnej medzery zabezpečuje servomechanizmus, ktorý sa nachádza na každom EDM stroji.²

Parametre výkonu strojov:

- rýchlosť úberu materiálu: $220 \text{ až } 700 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$,
- kvalita dosiahnutého povrchu $R_z = 0,15 \text{ až } 0,5 \text{ } \mu\text{m}$,
- inkrement odmeriavania polohy: $0,005 \text{ až } 0,001 \text{ mm}$.²

Stroje WEDM sú realizované v dvoch konštrukčných prevedeniach – stojanové, portálové. Stojanové je vhodné použiť na menšie obrobky, s menšou hmotnosťou, objemom.

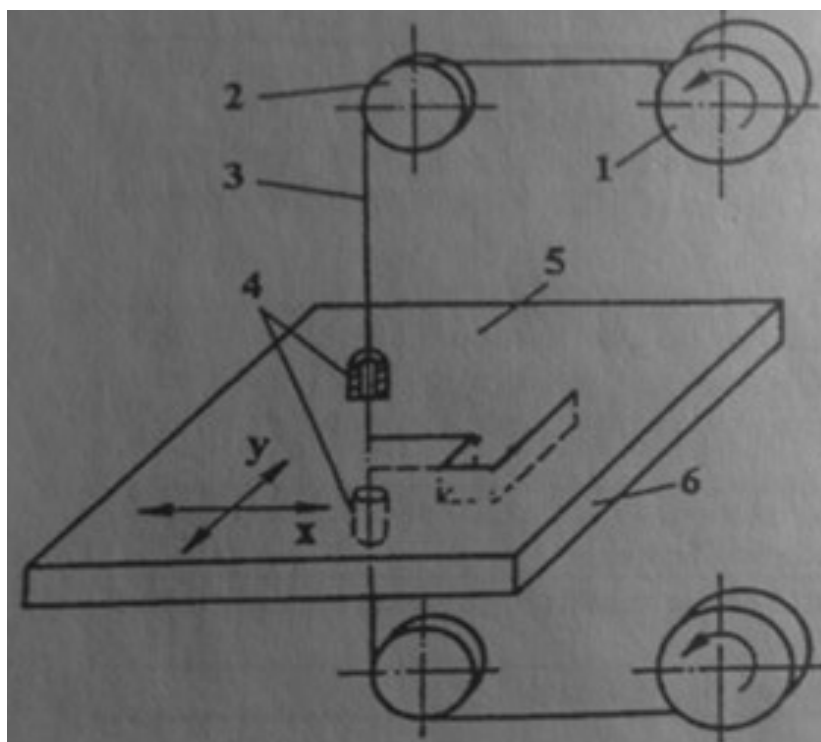
Portálové sú výhodné na obrábanie väčších obrobkov. Na proces riadenia býva využívané CNC riadenie.²

Parametre výkonu strojov:

- maximálna výška obrobku: až 300 mm,
- priemer rezacieho drôtu: 0,03 až 0,33 mm,
- maximálny výkon obrábania: až $300 \text{ mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$,
- stredná tolerancia rezaných rozmerov $\pm 0,003$ až $0,006 \text{ mm}$,
- kvalita dosiahnutého povrchu $R_z = 0,15$ až $0,6 \text{ } \mu\text{m}$.²

1.1.7. Elektroerozívne rezanie drôtom

Elektroerozívne rezanie drôtom skrátene WEDM (z ang. Wire Electrical Discharge Machining). Proces obrábania, resp. rezania, prebieha na špeciálnych strojoch určených výhradne na túto technológiu obrábania. Nástrojovou elektródou je drôt s kruhovým prierezom a s priemerom 0,02 až 0,3 mm. Pri obrábaní sa drôt odvíja z jednej cievky na druhú a naopak, a pohybuje sa vertikálnym smerom po vopred stanovenej dráhe. Prevíjanie pomáha zabrániť opotrebovaniu v mieste rezu. Nástroj má schopnosť odoberať materiál v každom smere. Nástroj a obrobok tvoria elektródy opačnej polarity, ktorých zapojenie je závislé od druhu výboja a type konštrukcie obrábacieho stroja. Obrobok sa upína na pracovný stôl stroja, kde je mu umožnený pohyb v smere horizontálnom alebo je jeho pohyb znemožnený. Záleží tak od druhu zariadenia, ktorá z elektród bude vykonávať hlavný pohyb.



Obr. 9 – Schéma elektroiskrového rezania drôtovou elektródou⁸

Kde:

- 1 – cievka,
- 2 – napínacia kladka,
- 3 – drôtová elektróda,
- 4 – vedenie,
- 5 – obrobok,
- 6 – riadený pohyb obrobku.

Drôtové elektródy

Pracovnú elektródu tvorí odvíjajúci sa drôt. Materiál drôtu závisí na veľkosti obrobku. Drôty, ktoré tvorí meď sú používané najčastejšie. Drôty z mosadze sa využívajú na rezanie obrobkov s väčším prierezom. Drôty z medi a mosadze sa môžu aj pozinkovať. Na rezy jemného charakteru, kde je potrebné použiť drôty s veľmi malými priermi (0,03 až 0,07 mm), sa používa materiál ako volfrám, poprípade molybdén pre ich mechanickú pevnosť.

Drôtové elektródy sa vyrábajú ťahaním za studena, pre tvorbu vrstiev, ktoré zväčšujú výkon rezania. Najväčší vplyv na výkon rezania má množstvo prítomného zinku v erodovanom povrchu drôtu, výkon je priamo úmerný jeho množstvu. Obsah zinku v povlakoch dosahuje v niektorých prípadoch až 65%. Výhodou takýchto povlakov je aj to, že majú vplyv, resp. zlepšujú kvalitu obrábaného povrchu. Zinok nie je jediný materiál, ktorým sa drôty povlakuje. Využíva sa aj meď na oceľové drôty, ktorá zvyšuje elektrickú vodivosť, poprípade grafit, ten sa vyznačuje nízkym koeficientom trenia a slúži na zlepšenie rýchlosti odvíjania drôtu. ²

Drôty používané technológiou WEDM je možné rozdeliť podľa ich pevnosti na:

- tvrdé – $R_m < 450 \text{ MPa}$,
- polotvrde – $R_m = 450 \text{ až } 800 \text{ MPa}$,
- tvrdé – $R_m > 800 \text{ MPa}$.

Podľa pevnosti sú drôty určené na špecifické aplikácie. Tvrdé drôty sa pre ich vysokú pevnosť používajú na dokončovacie operácie, pretože udržiavajú presnosť rezu, priamosť a to aj v prechodových častiach obrobku ako sú napríklad rohy, pri veľkom napnutí drôtu.



Obr. 10 – Drôtové elektródy¹⁵

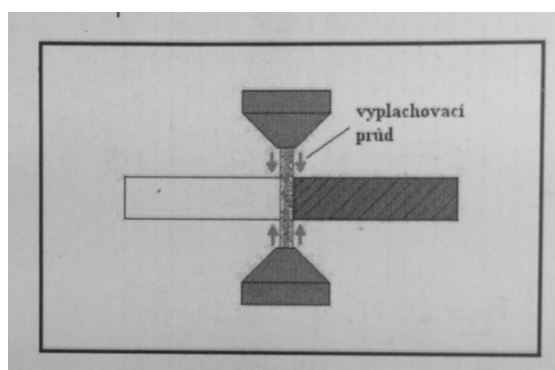
Dielektrikum

Pri technológii WEDM sa ako dielektrikum najčastejšie používa deionizovaná voda. Vhodné sú taktiež aj ďalšie nízkoviskózne kvapaliny, poprípade niektoré druhy ľahkých olejov. Hlavnou funkciou dielektrika pri použití technológie WEDM je zabezpečenie dostatočného chladenia obrábanej súčiastky v mieste rezu ako aj drôtovej elektródy. Ďalšou podstatnou funkciou dielektrika je odplavovanie erózných splodín z miesta rezu.¹⁸

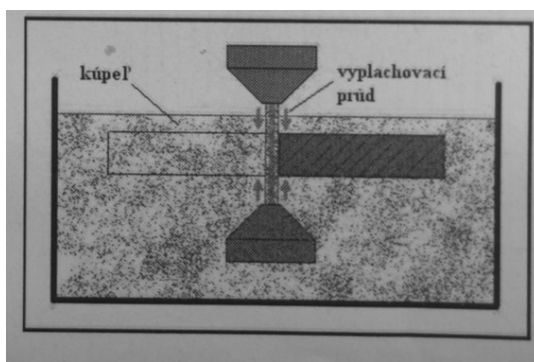
Vyplachovanie dielektrika

Pri procese obrábanie metódou WEDM vznikajú v mieste rezu splodiny, ktoré je potrebné odstrániť. Na to sa využíva vyplachovanie dielektrikom. Vyplachovanie sa používa dvoma spôsobmi:

- vyplachovanie prúdom dielektrika z dolnej a hornej trysky prívodu dielektrika (obr. 11),
- vyplachovanie prúdom dielektrika ponorením obrábanej súčiastky do kúpeľu a prúdom dielektrika z trysiek (obr. 12).



Obr. 11 – Vyplachovanie prúdom dielektrika²



Obr. 12 – Vyplachovanie prúdom dielektrika v kúpeli ²

Výhodnejší spôsob je uvedený na obrázku 12, kvôli stálemu zaplaveniu pracovného priestoru a lepšej tepelnej stabilite obrobku. ²

Použitie WEDM

Technológia WEDM nachádza využitie hlavne na:

- výrobu tvarovo-zložitých priechodných otvorov a obvodov (funkčné tvary strižníc, zložité tvary šablón, rezných a strižných nástrojov zo SK a podobne),
- super presné elektroiskrové brúsenie jemných ihiel drôtovou elektródou,
- presné tvarové dokončovanie alebo orovnávanie brúsnych a diamantových kotúčov,
- výroba zápustiek na hĺbenie dutín,
- vyrezávanie zložitých tvarov strižníkov (náhrada frézovania),
- obrábanie ultratvrdých vodivých materiálov (SiC , $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$, ZrB_2),
- rezanie tvarových rezných nástrojov z polykryštálu diamantu,
- rezanie nástrojov z nitridu bódu. ²

Technológia WEDM v porovnaní s elektroiskrovým hĺbením má výhodu v:

- možnosť vykonávať obrábanie aj bez potreby výroby tvarovo zložitej elektródy,
- možnosť použitia NC riadenia posuvu obrobku po požadovanej dráhe,
- možnosť vykonávať operácie, kde je šírka rezu súčasne požadovanou šírkou drážky, strižnej vôle alebo štrbiny,
- možnosť tvarovania obrobku s potrebnými úkosmi stien naklonením osi drôtovej elektródy pomocou vychyl'ovačov elektród. ²

1.2. Parametre drsnosti povrchu

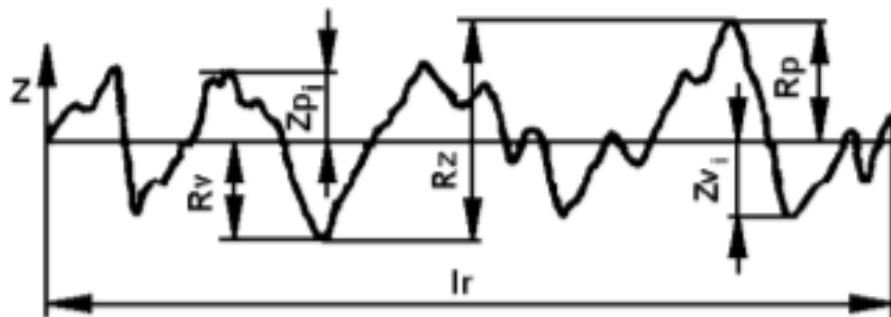
Norma ČSN EN ISO 4287 definuje tieto geometrické parametre:

- R – značenie drsnosti povrchu,
- W – značenie vlnitosti povrchu,

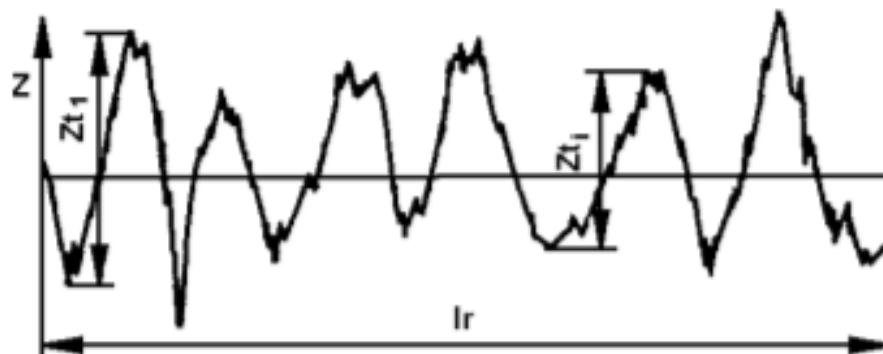
- P – značenie základného profilu. ^{16,17}

Značenie drsnosti povrchu okrem písmena R obsahuje aj doplnkové písmeno, ktoré bližšie špecifikuje o akú konkrétnu drsnosť sa jedná. Jednotlivé označenia drsnosti povrchu sú:

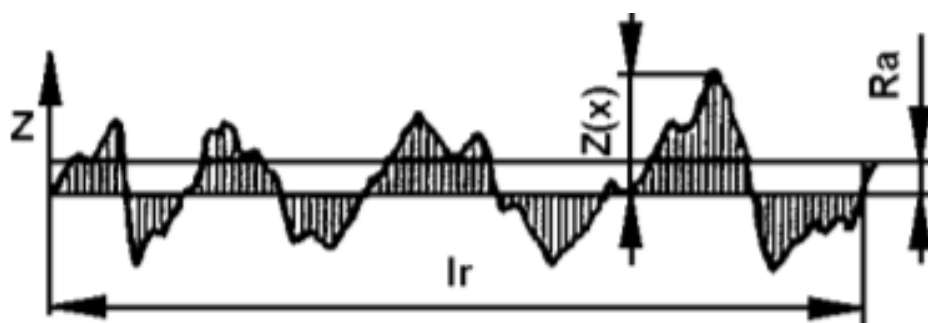
- R_p – výška Z_p najväčšieho výstupku profilu v rozsahu základnej dĺžky l_r , obrázok 13,
- R_v – hĺbka Z_v najnižšieho prehĺbenia profilu v rozsahu základnej dĺžky l_r , obrázok 13,
- R_z – súčet výšky Z_p najväčšieho výstupku profilu a hĺbky Z_v najnižšieho prehĺbenia v rozsahu základnej dĺžky l_r , obrázok 13,
- R_c – priemerná hodnota výšok Z_t prvkov profilov v rozsahu základnej dĺžky l_r . Meranie drsnosti R_c vyžaduje, aby bola zadaná jedna vertikálna a jedna horizontálna hladina rezu ako na obrázku 14 ,
- R_t – súčet výšky Z_p najväčšieho výstupku a hĺbky Z_v najnižšej hĺbky v rozsahu vyhodnocovanej dĺžky l_n ,
- R_a – aritmetický priemer absolútnych hodnôt $Z(x)$ v rozsahu základnej dĺžky l_r , obrázok 15,
- R_q – priemerná kvadratická hodnota $Z(x)$ v rozsahu základnej dĺžky l_r , obrázok 16. ¹⁷



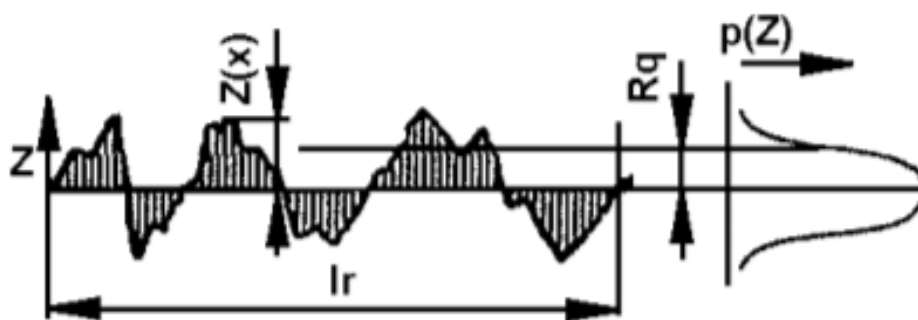
Obr. 13 – Parametre drsnosti R_p , R_v , R_z ¹⁶



Obr. 14 – Parameter drsnosti R_c ¹⁶



Obr. 15 – Parameter drsnosti R_a ¹⁶



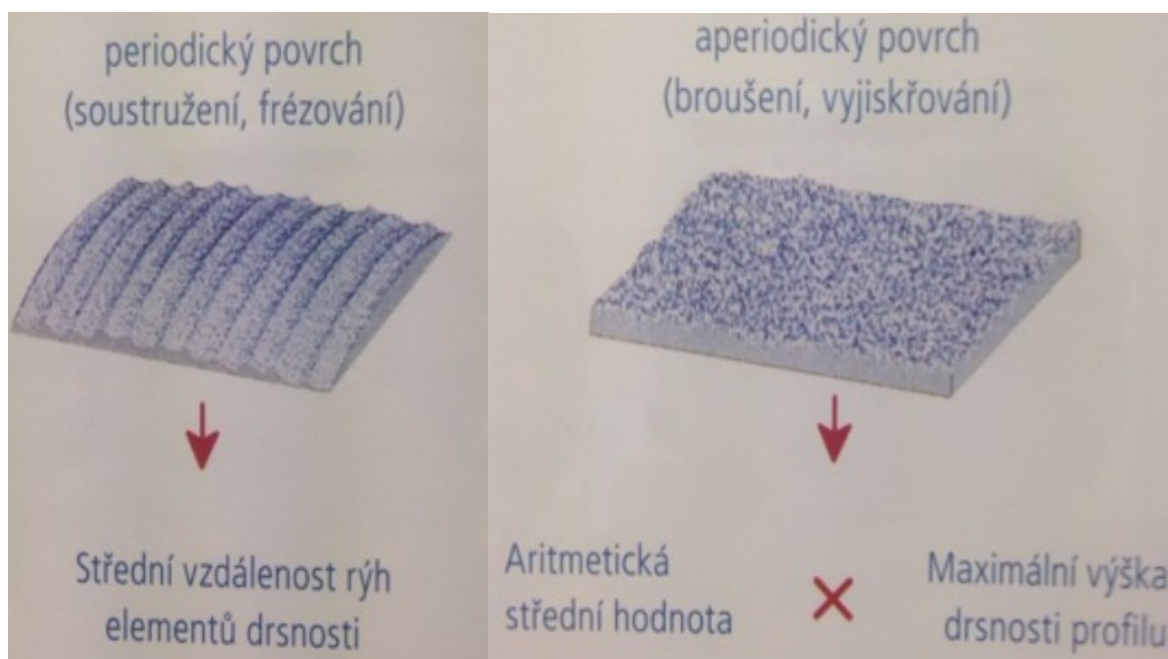
Obr. 16 – Parameter drsnosti R_q ¹⁶

2. Návrh a realizácia experimentu

Po obrobení perodrážky technológiou WEDM ostali protikusy, ktorých profily povrchov boli totožné s tými na obrobenej súčiastke. Na meranie som použil práve protikusy, pre ich menšie rozmery a jednoduchší prístup na meranú plochu. Rozmery protikusov sú uvedené v tabuľke 4, kapitola 2.2.1.

Cieľom experimentu bolo nameranie hodnôt R_a a R_z drsností povrchov, a zistiť či namerané hodnoty vyhovujú predpísanej norme ČSN 02 2507, ktorá predpisuje rozmery a hodnoty drsností drážky pre pero, na dne drážky $R_a = 6,3 \mu\text{m}$ a po stranách $R_a = 3,2 \mu\text{m}$. Meranie 2D ako aj 3D drsnosti som vykonal na dne protikusu perodrážky. To však vyhovuje norme, ktorá predpisuje drsnosť drážky pre pero na stenách, pretože sa počas tvorby drážky nemenili parametre výrobného stroja, preto by hodnoty drsností mali byť všade rovnaké.

Meranie 2D drsnosti som vykonal na drsnomeri Mitutoyo Surftest SJ-400 a drsnosť 3D na optickom mikroskope Alicona InfiniteFocus G5. Pretože drážka bola vyrobená technológiou WEDM jej povrch je aperiodický.



Obr. 17 – Periodický a aperiodický povrch ¹²

2.1. Návrh experimentu

2.1.1. Rozbor ocele EN 1.4301

Obrábanú súčiastku tvorí austenitická oceľ s označením EN 1.4301, označovaná aj podľa normy ČSN 10088-1 ako EN 1.4301 (X5CrNi 18-10). Staršia norma ČSN 42 0002:1976 uvádza označenie tejto ocele číslom 17 240. Na obrázku 18 sú uvedené legujúce prvky pre oceľ triedy 17. Obsah legujúcich prvkov ocele EN 1.4301, ktorý zaručuje výrobca je uvedený v tabuľke 1.^{9,10}

Trieda oceli	Oceli podľa		Charakteristika ocelí
	použití	stupně legování	
10	kon- strukční	nelegované	předepsané hodnoty mechanických vlastností, chemické složení není předepsáno
11			předepsané hodnoty mechanických vlastností a obsah C, P, S popř. (P+S) i dalších prvků
12			předepsaný obsah C, Mn, Si, P popř. (P+S) i dalších prvků
13		nizkolegované	legovací prvky: Mn, Si, Mn - Si, Mn - V
14			legovací prvky: Cr, Cr - Al, Cr - Mn, Cr - Si, Cr - Mn - Si
15			legovací prvky: Mo, Mn - Mo, Cr - Mo, Cr - V, Cr - W, Mn - Cr - V, Cr - Mo - V, Cr - Si - Mo - V, Cr - Mo - V - W
16		legované	legovací prvky: Ni, Cr - Ni, Ni - V, Cr - Ni - Mn, Cr - Ni - V, Cr - Ni - W, Cr - Ni - Mo, Cr - V - W, Cr - Mo - V - W
17			
19	nástro- jové	nelegované	Předepsaný obsah C, Mn, Si, P, S
		legované (nizko, středně, vysoko)	legovací prvky: Cr, V, Cr - Ni, Cr - Mo, Cr - Si, Cr - V, Cr - W, Cr - Al, Cr - Ni - W, Cr - Si - V, Cr - Mo - V, Cr - V - W, Cr - Ni - Mo - V, Cr - V - W - Co, Cr - Ni - Mo - W, Cr - Ni - V - W atd.

Obr. 18 – Označenie tried ocelí podľa ČSN 42 0002:1976 ¹⁰

Tabuľka 1 – Legujúce prvky ocele EN 1.4301 ⁹

Legujúce prvky		
Cr [%]	Ni [%]	C [%]
17 až 19,5	8 až 10,5	< 0,07

Mechanické vlastnosti ocele EN 1.4301

Medza pevnosti v ťahu, medza klzu a ťažnosť materiálu sú uvedené v tabuľke 2. Žihacia teplota ocele je v rozmedzí 1000 až 1100°C a chladenie prebieha na vzduchu alebo sa chladí vodou. Táto oceľ sa vyznačuje, že je nemagnetická a nekaliteľná. Má sklon k spevňovaniu za studena pri ťahaní alebo pri trieskovom obrábaní nevhodnými reznými podmienkami. Je odolná voči korózii v bežnom prostredí (voda, slabé kyseliny, priemyslové a veľkomestské atmosféry), no náchylná na medzikryštálovú koróziu v oblasti tepelného ovplyvnenia (napríklad zvary). ⁹

Tabuľka 2 – Mechanické vlastnosti ocele EN 1.4301 ⁹

Mechanické vlastnosti		
R_m [MPa]	R_e [MPa]	A80 [%]
520 až 720	210	min. 45

Technologická využiteľnosť ocele EN 1.4301

Oceľ je zvariteľná, no v oblasti zvaru je náchylná na medzikryštálovú koróziu (pri zvaroch nad 5 mm je nutné žihanie). Je vhodná na preťahovanie, strihanie, ohýbanie, trieskové obrábanie. ⁹

2.1.2. Použitá technológia na výrobu perodrážky

Na výrobu perodrážky obrobku (príloha A) bola použitá technológia WEDM, ktorej popis je uvedený v kapitole 1.1.7. Ako pracovný stroj bola použitá elektroerozívna drôtová rezačka CHMER G32F s CNC riadením (obrázok 19), ktorej parametre sú uvedené v tabuľke 3. Nástrojovú elektródu tvoril mosadzný drôt s pevnosťou 1000 MPa, určený na obrábanie technológiou WEDM. Použitie dielektrikum bola demineralizovaná voda, vyrobená reverznou osmózou priamo v laboratóriu.

Použitie pracovné parametre pre materiál EN 1.4301

Veľkosť výbojov bola daná napätím servomotoru pri procese rezania, ktorého hodnota bola 65V. Výkon stroja bol využitý na 50% s vyššími požiadavkami na stabilitu výbojov. Priemerná rýchlosť rezu bola 1,2 mm.min⁻¹. Výplach dielektrika bol 5kg.cm⁻² Parametre boli znížené z dôvodu dodržania rozmerovej presnosti drážky pre pero.



Obr. 19 – Elektroerozívna drôtová rezačka CHMER G32F ¹¹

2.1.3. Drsnomer Mitutoyo Surftest SJ-400

Jedná sa o prenosný prístroj na meranie drsnosti povrchu, pre vyhodnocovanie primárnych profilov, parametrov, drsnosti a vlnitosti. Pracuje pomocou softwaru SJ-Tools. Splňuje normy DIN EN ISO, VDA, JIS. ¹³

Parametre a funkcie drsnomeru:

- funkcia automatickej kalibrácie,
- zdvih snímača (rozsah osy Z) 800 µm,
- delenie 0,0001 µm,
- voliteľný posuv (rozsah osy X) 25 alebo 50 mm,
- najmenší Cut-off 0,08 mm,
- možnosť uloženia až piatich meracích podmienok,
- možnosť tlače nameraných hodnôt cez zabudovanú tlačiareň,
- možnosť pripojenia na ovládací a vyhodnocovací software SURFPAK-SJ. ¹³

Drsnomerom je možné merať:

- profil P – nefiltrovaný profil drsnosti podľa DIN EN ISO 3274,
- profil R – odfiltrovaný profil drsnosti podľa DIN EN ISO 4287,
- profil W – odfiltrovaný profil vlnitosti podľa DIN EN ISO 4287,
- profil DF – zvláštne filtrovanie profilu drsnosti podľa DIN EN ISO 13565. ¹³

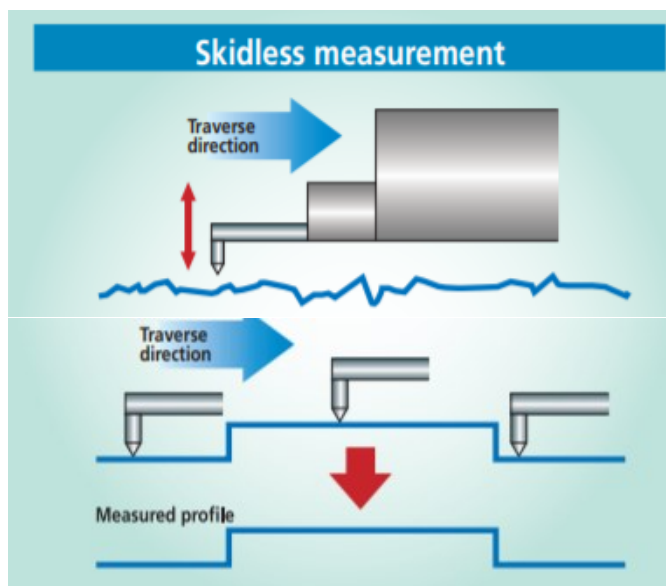
Drsnomerom Mitutoyou Surftest SJ-400 je možno merať dvoma spôsobmi: bez šmyku a so šmykom.

Meranie bez šmyku

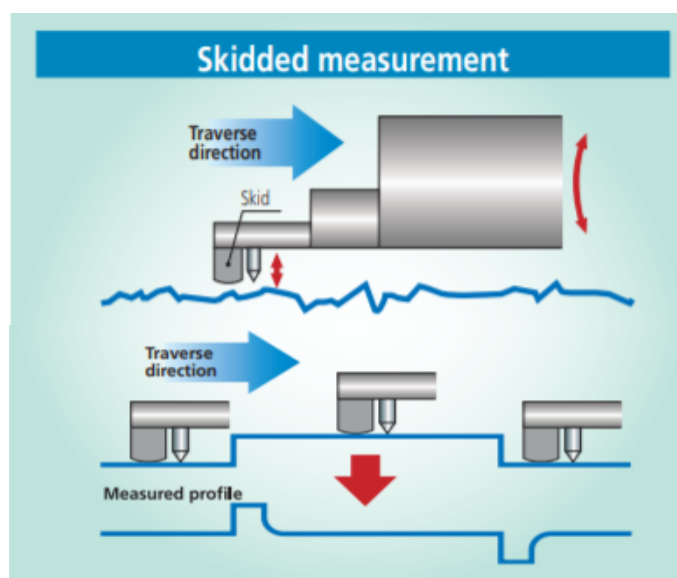
Meranie bez šmyku je miesto, kde sa merajú povrchové vlastnosti vzhľadom na referenčnú plochu hnacej jednotky. Merané vlastnosti ako vlnitosť a jemne odstupňované prvky sú presné, avšak drsnosti povrchu nie. Merací rozsah je obmedzený na dostupnosť hrotu. Princíp je uvedený na obrázku 20. ¹⁴

Meranie so šmykom

Pri šmykovom meraní sa povrchové vlastnosti merajú s ohľadom na šmyk nasledujúci tesne za dotykovým hrotom. Vlnitosť a stupňovité funkcie nie sú merané s veľkou presnosťou, ale výhodou je väčší merací rozsah, pretože šmyk kopíruje obrys povrchu obrobku. Princíp je uvedený na obrázku 21. ¹⁴



Obr. 20 – Meranie bez šmyku (traverse direction = smer pohybu, measured profile = meraný profil) ¹⁴



Obr. 21 – Meranie so šmykom (skid = šmyk) ¹⁴

2.1.4. Optický 3D mikroskop Alicona InfiniteFocus G5

Alicona InfiniteFocus G5 predstavuje meranie optickej mikrokoordinácie v jednom systéme. InfiniteFocus je vysoko presný, rýchly a flexibilný optický 3D systém. Užívatelia majú úžitok z 3D mikrosúradnicového meracieho stroja a merania drsností povrchov sú takmer neobmedzené. Všetky relevantné povrchové vlastnosti mikro-presných komponentov sa merajú, len pomocou jedného multifunkčného meracieho senzora. Užívatelia dosahujú sledovateľné merania, čo vedie k vysokej opakovateľnosti a vertikálnemu rozlíšeniu až do 10 nm. Robustný princíp merania Focus-Variation v kombinácii s hardvérom na izoláciu vibrácií umožňuje meranie tvaru drsnosti aj veľkých a ťažkých komponentov. Rýchlosť merania dosahuje menej ako 1,7 miliónov bodov za sekundu. Všetky osy InfiniteFocus sú vybavené

vysoko presnými snímačmi, ktoré zaisťujú presný pohyb v stupňoch. S automatizačným rozhraním sa InfiniteFocus používa aj na plné automatické meranie vo výrobe. Tabuľka 7 uvádza všeobecné parametre mikroskopu Alicona InfiniteFocus G5. Príloha A bližšie uvádza všetky technické parametre prístroja a ich rozsah. ¹²

Tabuľka 3 – Všeobecné parametre Alicona InfiniteFocus G5 ¹²

Pracovný objem (X,Y,Z)	100 mm x 100 mm x 100 mm = 1 000 000 mm
	200 mm x 200 mm x 100 mm = 4 000 000 mm
	200 mm x 200 mm x 200 mm = 8 000 000 mm
Maximálna hmotnosť vzorky	30 kg; viac na požiadanie výrobcu

2.2. Realizácia experimentu

2.2.1. Meranie 2D drsnosti

Príprava na meranie

Samotnému meraniu 2D drsnosti predchádzala príprava na toto meranie, takisto som sa musel oboznámiť s meracím prístrojom a jeho funkciami. Poskytnutých vzoriek bolo 10, ktoré som označil fixou číslami od 1 po 10 zo spodnej strany (obrázok 22). Vzorky som vizuálne skontroloval a následne očistil od prípadných znečistení na meranej ploche. Potom som zmeral ich rozmery posuvným meradlom. Namerané hodnoty sú prehľadne uvedené v tabuľke 5. Pred samotným meraním 2D drsnosti som skontroloval pracovné podmienky v laboratóriu ako je teplota, vlhkosť či tlak. Zoznam použitých pomôcok použitých v meraní je uvedený v tabuľke 4.

Pracovné podmienky:

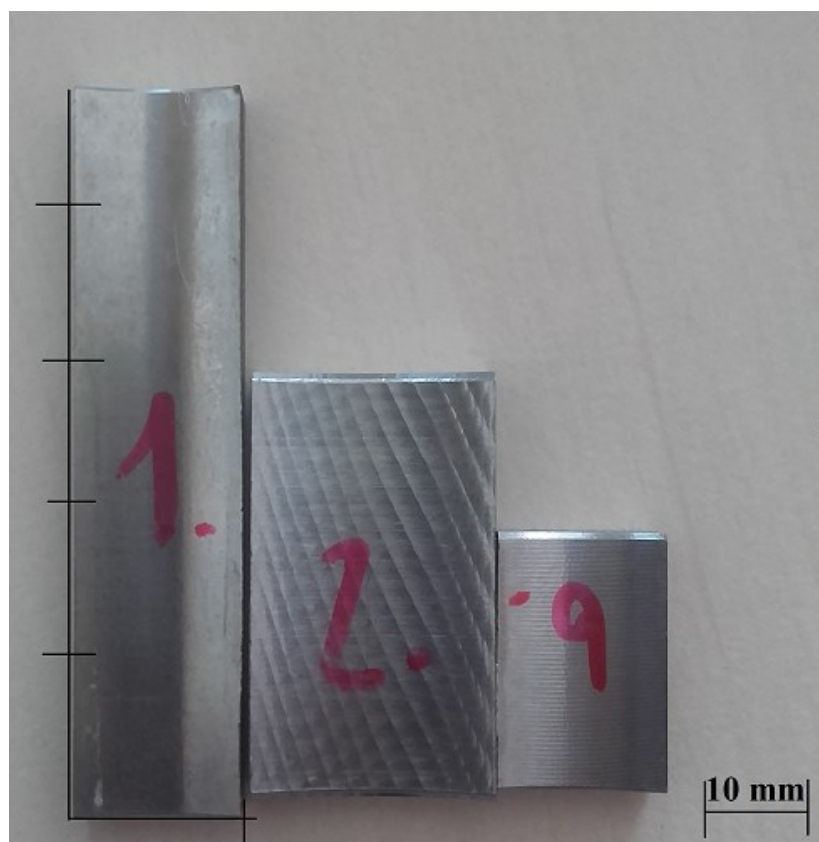
- Teplota okolia : $t = 21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
- Vlhkosť vzduchu: $h = 60 \%$
- Tlak: $p = 101 \text{ kPa}$

Tabuľka 4 – Zoznam použitých pomôcok

Pracovné pomôcky
Posuvné meradlo
Drsnomer Mitutoyo SJ-400
Plastelína
Mikrometrický stolček
Vzorky 1 až 10

Tabuľka 5 – Rozmery protikusov perodrážky

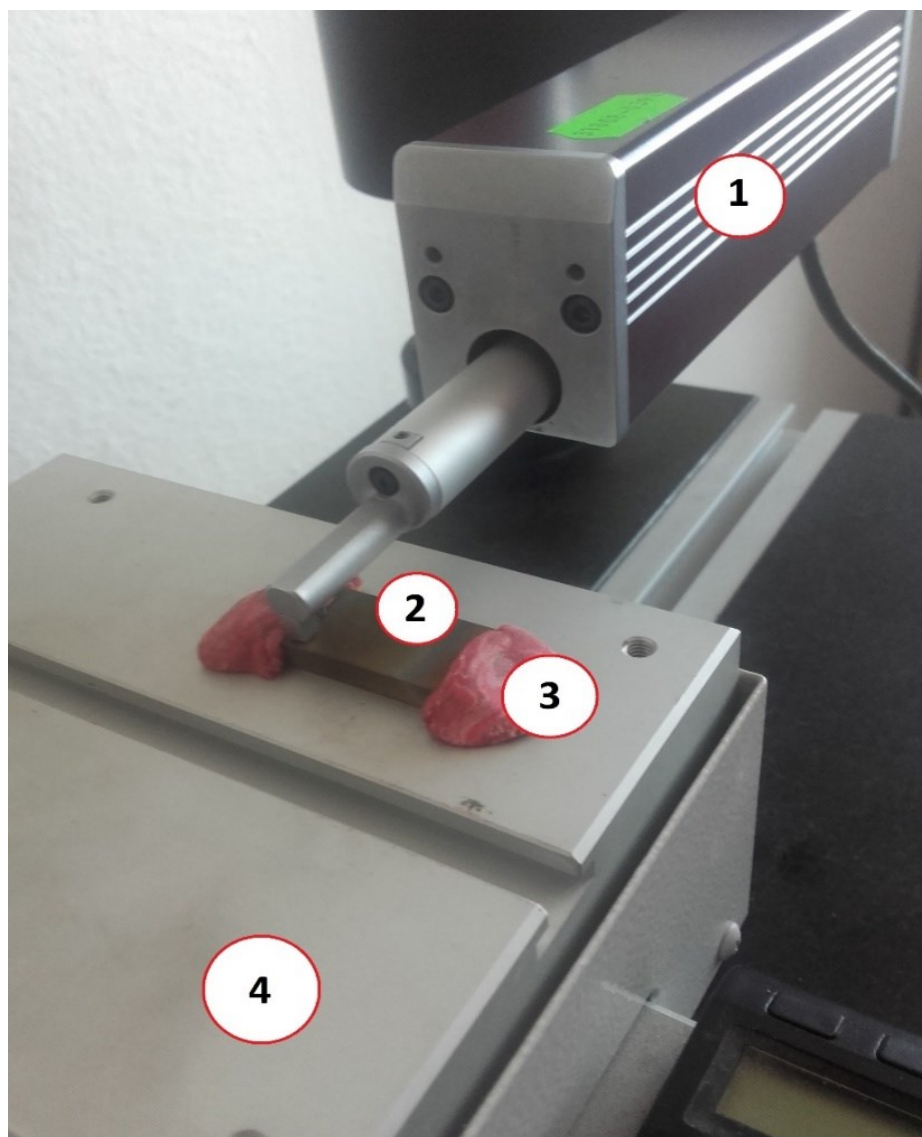
Číslo vzorky	1	2,3,4	5,6,7	8,9,10
Výška vzorky (mm)	43	25	15	10
Šírka vzorky (mm)	10	15	10	15



Obr. 22 – Označenie vzoriek

Pracovný postup

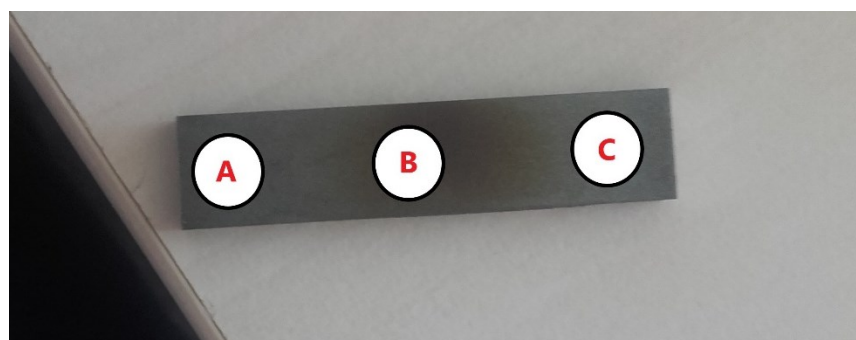
Samotnú prácu som začal vynulovaním, skalibrovaním pracovného meradla. Následne som na drsnomeri Mitutoyo SJ-400 zvolil parametre, ktoré chcem merať, t.j. drsnosť Ra a Rz. Meranú vzorku som položil na mikrometrický stolček, aby som mal istotu, že leží na rovnej ploche, následne som vzorku zaistil proti možnému pohybu plastelínou a priložil hrot meradla na začiatok vzorky, tak aby bolo možné zmerať jej drsnosť. Meranie znázorňuje obrázok 23. Meranie som vykonal na 3 miestach súčiastky – na oboch koncoch a v strede, ako je znázornené na obrázku 24. Na každom z týchto miest som vykonal 3 merania s posunutím prístroja približne o 1 až 2 mm. Celkovo som tak vykonal 9 meraní na každej vzorke. Vzorka č.1 je jedinou so svojimi rozmermi a slúži len ako skúšobná. Ostatné vzorky sú so svojimi rozmermi v trojiciach. Výsledky som prehľadne spracoval do tabuliek, ktoré sa nachádzajú v kapitole 3.1.



Obr. 23 – Meranie drsnosti povrchu na vzorke

Kde:

- 1 – Drsnomer Mitutoyo Surftest SJ-400
- 2 – Meraný povrch vzorky
- 3 – Plastelína (slúžiaca na fixáciu vzorky)
- 4 – Mikrometrický stolček



Obr. 24 – Miesta merania drsnosti vzoriek

2.2.2. Meranie 3D drsnosti

Príprava na meranie

Pred samotným meraním na optickom mikroskope InfiniteFocus G5 som sa musel oboznámiť s jeho obsluhou a so softwarom, ktorý podporuje tento typ prístroja. Ďalej som skontroloval podmienky v laboratóriu. Taktiež som si pripravil vzorky, ktorých rozmery som už poznal z merania 2D drsnosti a preventívne ich očistil od možných nečistôt ktoré by mohli ovplyvniť výsledky merania.

Pracovné podmienky:

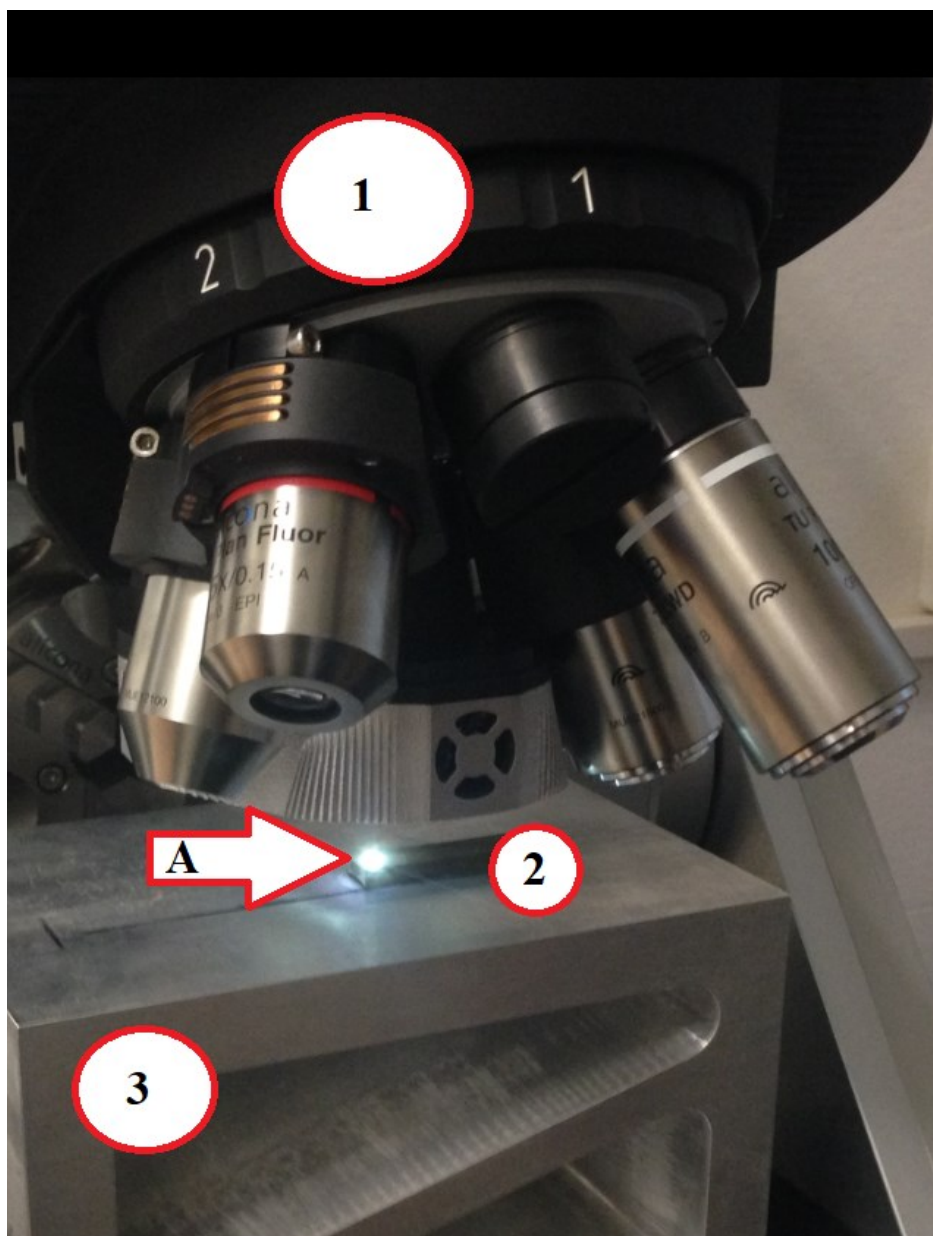
- Teplota okolia : $t = 20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
- Vlhkosť vzduchu: $h = 62 \%$
- Tlak: $p = 101 \text{ kPa}$

Pracovný postup

Meranie som začal zvolením filtra medznej vlnovej dĺžky λ_c (označovaná aj ako l_c). Hodnota tohto filtra som určil z obrázku 26, ktorý udáva filtre pre neperiodické povrchy. Merania 2D drsnosti ukázali, že hodnoty R_a som mohol očakávať okolo $2 \mu\text{m}$ a preto som zvolil hodnotu filtra $\lambda_c = 800 \mu\text{m}$. Následné som pod objektív mikroskopu položil vzorku č.1, ktorú nebolo potrebné nijak zvlášť upínať, keďže sa jedná o bezdotykové meranie. Zvolené parametre som zadal do softwaru a začal merať. Merané miesta boli rovnaké ako pri meraní 2D drsnosti. Rozdiel bol v počte meraní, keďže optický mikroskop meria pásma, počet celkových meraní pre jednu vzorku bol 3. Šírku pásma udáva obrázok 21. Software v každom mieste vyhodnotil drsnosť R_a , R_z a zobrazil model povrchu v danom mieste merania. Výstupné hodnoty som prehľadne zaznamenal do tabuliek 10 až 13 v kapitole 3.2. Princíp merania je zobrazený na obrázku 25. V prílohe B sú uvedené parametre nastavenia merania prístroja.

V prílohe C je zobrazené porovnanie nameranej drsnosti v rovnakom mieste merania – C, pri každej výške vzorky (vzorka 4 = 25 mm výška, vzorka 7 = 15 mm výška, vzorka 10 = 10 mm výška). Všetky namerané snímky sú uvedené v prílohe D aj s popisom.

Celé meranie prebiehalo pod odborným dohľadom vedúceho práce pána Ing. Františka Špaleka a pána doc. Ing. Mareka Sadílka, Ph.D.



Obr. 25 – Meranie 3D drsnosti optickým mikroskopom InfiniteFocus G5

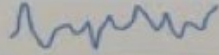
Kde:

1 – Optický mikroskop Alicona InfiniteFocus G5

2 – Meraná vzorka

3 – Doska s rovinnou plochou

A – snímanie miesta A

For random profiles 

Ra range	Lc	Profile length
0µm–0.02µm	80µm	0.4mm
0.02µm–0.1µm	250µm	1.25mm
0.1µm–2µm	800µm	4mm
2µm–10µm	2500µm	12.5mm
10µm–80µm	8000µm	40mm

Obr. 26 – Filtre pre neperiodické povrchy

3. Spracovanie dát z experimentálnej časti práce

3.1. Namerané hodnoty 2D drsnosti

Tabuľky 6 až 9 uvádzajú namerané hodnoty pomocou prístroja Mitutoyo Surftest SJ-400 a podľa pracovného postupu, ktorý je uvedený v kapitole 2.2.1. Popis prístroja sa nachádza v kapitole 2.1.3.

Tabuľka 6 – Namerané hodnoty povrchu Ra, Rz u vzorky 1 (uvedené hodnoty sú v μm)

Meranie vzorky č.1		
Číslo merania	Typ drsnosti	Nameraná hodnota
1	Ra	2,430
	Rz	15,500
2	Ra	2,470
	Rz	15,600
3	Ra	2,300
	Rz	13,600
4	Ra	2,300
	Rz	13,800
5	Ra	2,330
	Rz	14,000
6	Ra	2,290
	Rz	14,700
7	Ra	2,640
	Rz	16,700
8	Ra	2,480
	Rz	15,800
9	Ra	2,520
	Rz	15,600

Tabuľka 7 – Namerané hodnoty povrchu Ra, Rz u vzoriek 2,3,4 (uvedené hodnoty sú v μm)

Namerané hodnoty vzoriek 2 až 4				
Číslo merania	Typ drsnosti	Vzorka 2	Vzorka 3	Vzorka 4
1	Ra	2,420	2,570	2,460
	Rz	14,800	17,100	16,600
2	Ra	2,480	2,480	2,490
	Rz	13,800	16,600	16,300
3	Ra	2,540	2,450	2,480
	Rz	16,400	16,400	15,900
4	Ra	2,310	2,550	2,520
	Rz	14,700	16,500	15,100
5	Ra	2,360	2,570	2,290
	Rz	14,800	15,000	14,700
6	Ra	2,360	2,610	2,600
	Rz	14,700	16,500	16,300
7	Ra	2,350	2,600	2,440
	Rz	16,300	16,000	15,800
8	Ra	2,260	2,420	2,290
	Rz	14,700	14,900	14,900
9	Ra	2,340	2,370	2,200
	Rz	15,900	14,800	14,400

Tabuľka 8 – Namerané hodnoty povrchu Ra, Rz u vzoriek 5,6,7 (uvedené hodnoty sú v μm)

Namerané hodnoty vzoriek 5 až 7				
Číslo merania	Typ drsnosti	Vzorka 5	Vzorka 6	Vzorka 7
1	Ra	2,410	2,450	2,740
	Rz	15,600	15,600	17,900
2	Ra	2,410	2,580	2,250
	Rz	15,500	16,500	14,600
3	Ra	2,430	2,300	2,600
	Rz	15,500	15,100	15,000
4	Ra	2,310	2,530	2,570
	Rz	14,600	15,700	15,600
5	Ra	2,700	2,670	2,550
	Rz	16,500	16,400	18,300
6	Ra	2,640	2,550	2,840
	Rz	17,100	16,100	16,900
7	Ra	2,600	2,560	2,600
	Rz	16,100	15,700	16,100
8	Ra	2,560	2,350	2,350
	Rz	15,800	14,600	14,600
9	Ra	2,350	2,510	2,470
	Rz	13,300	15,500	14,900

Tabuľka 9 – Namerané hodnoty povrchu Ra, Rz u vzoriek 8,9,10 (uvedené hodnoty sú v μm)

Namerané hodnoty vzoriek 8 až 10				
Číslo merania	Typ drsnosti	Vzorka 8	Vzorka 9	Vzorka 10
1	Ra	2,850	2,520	2,480
	Rz	17,300	15,800	17,000
2	Ra	2,560	2,520	2,670
	Rz	16,100	17,100	17,100
3	Ra	2,370	2,370	2,460
	Rz	14,600	15,400	17,500
4	Ra	2,460	2,270	2,360
	Rz	16,900	15,200	16,300
5	Ra	2,550	2,700	2,520
	Rz	15,900	17,000	16,700
6	Ra	2,640	2,500	2,510
	Rz	16,400	16,300	15,200
7	Ra	2,450	2,320	2,450
	Rz	14,900	14,300	14,300
8	Ra	2,480	2,420	2,420
	Rz	15,600	16,300	16,400
9	Ra	2,390	2,520	2,380
	Rz	15,000	16,000	16,900

3.2. Namerané hodnoty 3D drsnosti

Tabuľky 10 až 13 zobrazujú hodnoty drsnosti povrchu, získané z jednotlivých vzoriek prístrojom Alicona InfiniteFocus G5, ktorý je popísaný v kapitole 2.1.4. a podľa pracovného postupu, ktorý je uvedený v kapitole 2.2.2.

Tabuľka 10 – Namerané hodnoty povrchu Ra, Rz u vzorky 1 (uvedené hodnoty sú v μm)

Meranie vzorky č.1		
Číslo merania	Typ drsnosti	Nameraná hodnota
1	Ra	1,264
	Rz	5,426
2	Ra	1,100
	Rz	4,891
3	Ra	1,591
	Rz	5,704

Tabuľka 11 – Namerané hodnoty povrchu Ra, Rz u vzoriek 2,3,4 (uvedené hodnoty sú v μm)

Namerané hodnoty vzoriek 2 až 4				
Číslo merania	Typ drsnosti	Vzorka 2	Vzorka 3	Vzorka 4
1	Ra	1,589	1,389	2,114
	Rz	6,930	5,257	6,900
2	Ra	1,579	1,757	2,016
	Rz	5,416	7,349	6,666
3	Ra	1,331	1,641	1,950
	Rz	4,819	5,717	7,116

Tabuľka 12 – Namerané hodnoty povrchu Ra, Rz u vzoriek 5,6,7 (uvedené hodnoty sú v μm)

Namerané hodnoty vzoriek 5 až 7				
Číslo merania	Typ drsnosti	Vzorka 5	Vzorka 6	Vzorka 7
1	Ra	1,422	1,871	1,935
	Rz	4,901	7,031	7,105
2	Ra	1,287	1,340	2,305
	Rz	5,366	4,689	6,699
3	Ra	1,446	1,425	2,030
	Rz	4,721	6,683	7,141

Tabuľka 13 – Namerané hodnoty povrchu Ra, Rz u vzoriek 8,9,10 (uvedené hodnoty sú v μm)

Namerané hodnoty vzoriek 8 až 10				
Číslo merania	Typ drsnosti	Vzorka 8	Vzorka 9	Vzorka 10
1	Ra	1,970	1,870	1,539
	Rz	7,688	6,697	5,518
2	Ra	1,843	1,890	1,286
	Rz	5,721	6,620	5,531
3	Ra	1,596	1,156	1,275
	Rz	5,477	5,129	5,920

3.3. Vyhodnotenie výsledkov

3.3.1. Namerané maximálne hodnoty Ra, Rz

Pomocou funkcie programu MS Excel boli zistené maximálne hodnoty drsností v oboch metódach merania. V prípade merania 2D drsnosti pomocou drsnomeru Mitutoyo Surftest SJ-400 bola nameraná maximálna hodnota drsnosti Ra na vzorke číslo 8, na mieste merania A s hodnotou $Ra = 2,850$. Maximálna hodnota drsnosti Rz bola nameraná na vzorke číslo 7 v mieste merania B s hodnotou $Rz = 18,300$. V tabuľkách 14 a 15 sú zaznačené maximálne hodnoty drsností Ra ako aj Rz. Z výsledkov boli vypustené namerané hodnoty drsností Ra a Rz pre vzorku číslo 1, pretože sa jedná iba o pokusnú vzorku, ktorá nebola ďalej meraná v trojici. Nebolo tak možné spraviť štatistické vyhodnotenie tejto vzorky.

Pri meraní drsností optickým mikroskopom Alicona InfiniteFocus G5 bola maximálna hodnota Ra zistená pri vzorke 7 v mieste merania B s hodnotou $Ra = 2,305 \mu m$. Najvyššia nameraná hodnota drsnosti typu Rz bola zistená na vzorke 8 v mieste merania A s hodnotou $Rz = 7,688 \mu m$. Tabuľky, kde sú zaznamenané maximálne hodnoty majú označenie 16 a 17. Rovnako ako pri vyhodnocovaní 2D metódy, boli aj tu vypustené hodnoty namerané pre vzorku číslo 1.

3.3.2. Štatistické spracovanie nameraných hodnôt

Pre namerané hodnoty drsností Ra a Rz som určil:

- aritmetický priemer,
- výberovú smerodatnú odchýlku,
- smerodatnú odchýlku rozptylu,
- neistotu merania typu A.

Vypočítané hodnoty som zaznamenal do tabuliek 14 až 17. Štatistické spracovanie pre celú vzorku som spravil z hodnôt po 2D aj 3D meraní. Pri spracovaní hodnôt pre celú vzorku ma zaujímalo ako sa bude správať drsnosť Ra a Rz s rastúcou výškou celej vzorky.

Tabuľka 14 – Štatistické spracovanie hodnôt drsnosti Ra po meraní na Surftest SJ-400 (uvedené hodnoty sú v μm)

Číslo merania/miesto merania	Hodnoty Ra									
	Vzorka1	Vzorka2	Vzorka3	Vzorka4	Vzorka5	Vzorka6	Vzorka7	Vzorka8	Vzorka9	Vzorka10
1/A	2,43	2,42	2,57	2,46	2,41	2,45	2,74	2,85	2,52	2,48
2/A	2,47	2,48	2,48	2,49	2,41	2,58	2,25	2,56	2,52	2,67
3/A	2,30	2,54	2,45	2,48	2,43	2,30	2,60	2,37	2,37	2,46
4/B	2,30	2,31	2,55	2,52	2,31	2,53	2,57	2,46	2,27	2,36
5/B	2,33	2,36	2,57	2,29	2,70	2,67	2,55	2,55	2,70	2,52
6/B	2,29	2,36	2,61	2,60	2,64	2,55	2,84	2,64	2,50	2,51
7/C	2,64	2,35	2,60	2,44	2,60	2,56	2,60	2,45	2,32	2,45
8/C	2,48	2,26	2,42	2,29	2,56	2,35	2,35	2,48	2,42	2,42
9/C	2,52	2,34	2,37	2,20	2,35	2,51	2,47	2,39	2,52	2,38
MAX	2,85									
Aritmetický priemer	2,418	2,380	2,513	2,419	2,490	2,500	2,552	2,528	2,460	2,472
Výber. Sm.odchýlka	0,122	0,086	0,086	0,130	0,138	0,116	0,181	0,148	0,130	0,092
Sm. Odchýlka rozptylu	0,041	0,029	0,029	0,043	0,046	0,039	0,060	0,049	0,043	0,031
Neistota typu A	0,092	0,065	0,065	0,098	0,104	0,087	0,136	0,111	0,098	0,069

Tabuľka 15 – Štatistické spracovanie hodnôt drsnosti Rz po meraní na Surftest SJ-400 (uvedené hodnoty sú v μm)

Číslo merania/miesto merania	Hodnoty Rz									
	Vzorka1	Vzorka2	Vzorka3	Vzorka4	Vzorka5	Vzorka6	Vzorka7	Vzorka8	Vzorka9	Vzorka10
1/A	15,50	14,80	17,10	16,60	15,60	15,60	17,90	17,30	15,80	17,00
2/A	15,60	13,80	16,60	16,30	15,50	16,50	14,60	16,10	17,10	17,10
3/A	13,60	16,40	16,40	15,90	15,50	15,10	15,00	14,60	15,40	17,50
4/B	13,80	14,70	16,50	15,10	14,60	15,70	15,60	16,90	15,20	16,30
5/B	14,00	14,80	15,00	14,70	16,50	16,40	18,30	15,90	17,00	16,70
6/B	14,70	14,70	16,50	16,30	17,10	16,10	16,90	16,40	16,30	15,20
7/C	16,70	16,30	16,00	15,80	16,10	15,70	16,10	14,90	14,30	14,30
8/C	15,80	14,70	14,90	14,90	15,80	14,60	14,60	15,60	16,30	16,40
9/C	15,60	15,90	14,80	14,40	13,30	15,50	14,90	15,00	16,00	16,90
MAX	18,30									
Aritmetický priemer	15,033	15,122	15,978	15,556	15,556	15,689	15,989	15,856	15,933	16,378
Výber. Sm.odchýlka	1,059	0,874	0,857	0,797	1,098	0,603	1,415	0,923	0,886	1,016
Sm. Odchýlka rozptylu	0,353	0,291	0,286	0,266	0,366	0,201	0,472	0,308	0,295	0,339
Neistota typu A	0,799	0,659	0,646	0,601	0,828	0,455	1,067	0,696	0,668	0,766

Príklad výpočtu aritmetického priemeru pre vzorku 3 z hodnôt Rz pre celú vzorku (postup platí aj pre hodnoty Ra a pre hodnoty namerané optickým mikroskopom, kde $n = 3$) je:

$$\bar{D}_{vzorka\ 3} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} = \frac{143,8}{9} = 15,978 \mu\text{m} \quad (3.1)$$

kde n je počet meraní.

Z vypočítaného aritmetického priemeru sa ďalej vypočíta výberová smerodatná odchýlka pre dané meranie zo vzťahu:

$$S_{(D)6/B} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2} = \sqrt{\frac{1}{8} \cdot (16,50 - 15,987)^2} = 0,273 \mu\text{m} \quad (3.2)$$

Vypočítaním výberovej smerodatnej odchýlky pre každé meranie som spravil sumu vypočítaných hodnôt:

$$S_{(D)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n S_{(D)i/X}} = \sqrt{\frac{1}{8} \cdot 5,876} = 0,857 \mu\text{m} \quad (3.3)$$

Z vypočítanej hodnoty pre výberovú smerodiatnú odchýlku som ďalej mohol určiť smerodiatnú odchýlku pre rozptyl:

$$S_{(\overline{D})} = \frac{S_{(D)}}{\sqrt{n}} = \frac{0,857}{\sqrt{9}} = 0,286 \mu m \quad (3.4)$$

Následne je možné určiť neistotu typu A pre drsnosť Rz u vzorky 3 po meraní drsnomerom SurfTest SJ-400 zo vzťahu:

$$u_a = S_{(\overline{D})} \cdot k = 0,286 \cdot 2,262 = 0,646 \mu m \quad (3.5)$$

kde k je študentove rozdelenie, ktorého hodnota je $k = 2,262$.

Výsledná hodnota drsnosti Rz pri vzorke 3 po meraní drsnomerom SurfTest SJ-400 je:

$$Rz = (15,978 \pm 0,646) \mu m \quad (3.6)$$

Tabuľka 16 – Štatistické spracovanie hodnôt drsnosti Ra po meraní na InfiniteFocus G5 (uvedené hodnoty sú v μm)

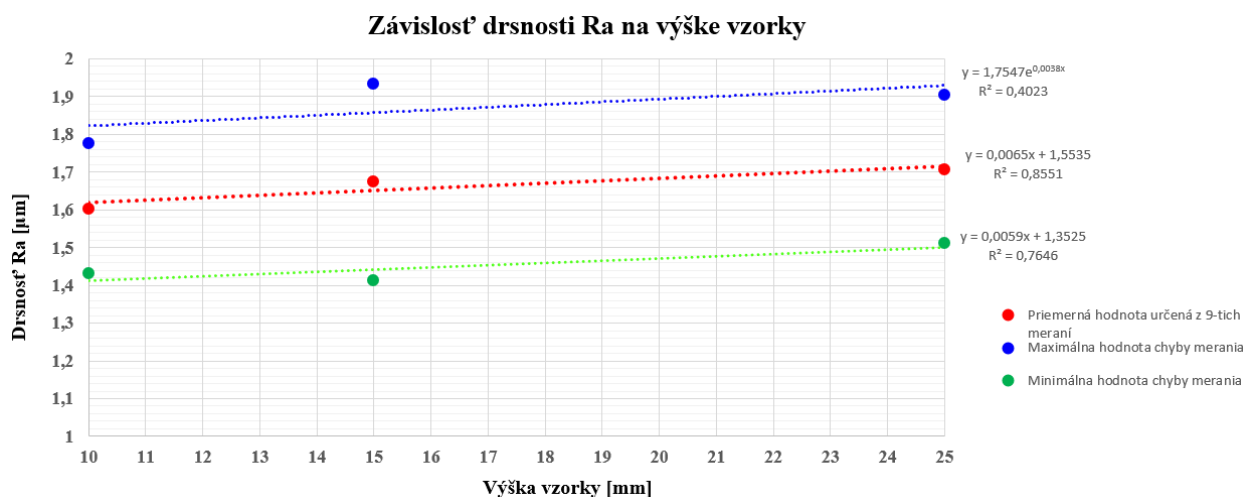
Číslo merania/miesto merania	Hodnoty Ra									
	Vzorka1	Vzorka2	Vzorka3	Vzorka4	Vzorka5	Vzorka6	Vzorka7	Vzorka8	Vzorka9	Vzorka10
1/A	1,264	1,589	1,389	2,114	1,422	1,871	1,935	1,970	1,870	1,539
2/B	1,100	1,579	1,757	2,016	1,287	1,340	2,305	1,843	1,890	1,286
3/C	1,591	1,331	1,641	1,950	1,446	1,425	2,030	1,596	1,156	1,275
Max	2,305									
Aritmetický priemer	1,318	1,500	1,596	2,027	1,385	1,545	2,090	1,803	1,639	1,367
Výberová smerodat. odchýlka	0,250	0,146	0,188	0,083	0,086	0,285	0,192	0,190	0,418	0,149
Smerodatná odchýlka rozptylu	0,144	0,084	0,109	0,048	0,049	0,165	0,111	0,110	0,241	0,086
Neistota typu A	0,326	0,191	0,246	0,108	0,112	0,372	0,251	0,248	0,546	0,195

Tabuľka 17 – Štatistické spracovanie hodnôt drsnosti Rz po meraní na InfiniteFocus G5 (uvedené hodnoty sú v μm)

Číslo merania/miesto merania	Hodnoty Rz									
	Vzorka1	Vzorka2	Vzorka3	Vzorka4	Vzorka5	Vzorka6	Vzorka7	Vzorka8	Vzorka9	Vzorka10
1/A	5,426	6,930	5,257	6,900	4,901	7,031	7,105	7,688	6,697	5,518
2/B	4,891	5,416	7,349	6,666	5,366	4,689	6,699	5,721	6,620	5,531
3/C	5,704	4,819	5,717	7,116	4,721	6,683	7,141	5,477	5,129	5,920
Max	7,688									
Aritmetický priemer	5,340	5,722	6,108	6,894	4,996	6,134	6,982	6,295	6,149	5,656
Výberová smerodat. odchýlka	0,413	1,088	1,099	0,225	0,333	1,264	0,245	1,212	0,884	0,228
Smerodatná odchýlka rozptylu	0,239	0,628	0,635	0,130	0,192	0,730	0,142	0,700	0,510	0,132
Neistota typu A	0,540	1,421	1,436	0,294	0,435	1,650	0,321	1,583	1,154	0,298

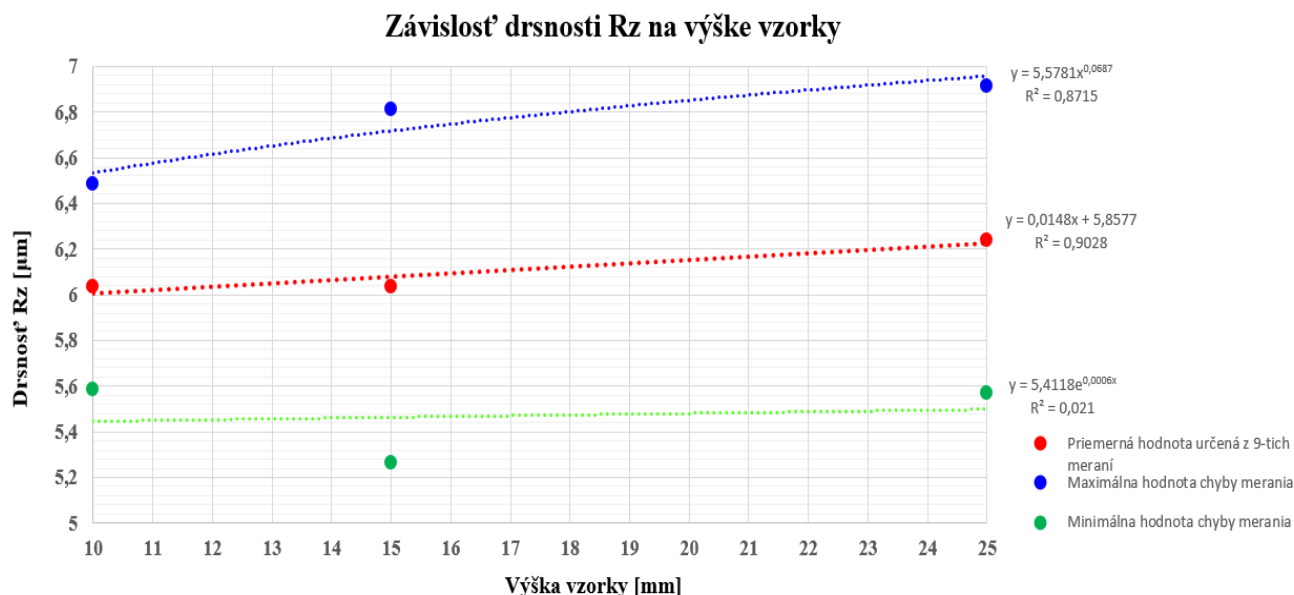
Z nameraných hodnôt optickým mikroskopom InfiniteFocus G5 som zisťoval, aký význam má výška vzorky na drsnosť Ra a Rz. Pre jednotlivé výšky som spravil aritmetický priemer a hodnoty uviedol do grafu č.1 a grafu č.2. Hodnoty som preložil spojnicou trendu (lineárnu priamku), ktorá zobrazuje rovnicu správania sa drsnosti v závislosti na výške. V grafe sú zaznamenané aj maximálne a minimálne chyby merania s vlastnými spojnicami trendu.

Graf 1 – Závislosť drsnosti Ra na výške vzorky



Z grafu č.1 je vidieť ako rastie nameraná priemerná hodnota drsnosti Ra s narastajúcou výškou. Podľa zvolenej spojnice trendu sa dá predpokladať, že výška vzorky bude dodržiavať predpísanú hodnotu drsnosti perodrážky $Ra = 3,2 \mu\text{m}$ podľa normy ČSN 02 2507, pri daných parametroch, až do výšky 253,3 mm. Takýto predpoklad podporuje aj značne vysoký koeficient spoľahlivosti R^2 až 85,51%. Pri pohľade na maximálnu chybu merania sa dá podľa spojnice trendu predpokladať, že povolenú hodnotu drsnosti $Ra = 3,2 \mu\text{m}$ dosiahne pri výške 158,12 mm. Koeficient spoľahlivosti R^2 je v tomto odhade nižší, konkrétne 40,23%. Pre presnejšie stanovenie maximálnej výšky by tak bolo nutné ďalšie meranie

Graf 2 – Závislosť drsnosti Rz na výške vzorky



Z grafu č.2 je vidieť rastúcu priemernú hodnotu drsnosti Rz s rastúcou výškou. Spoľahlivosť tohto rastúceho trendu je určená lineárnou spojnicou trendu, ktorá je vyjadrená rovnicou, kde je možné určiť priemernú hodnotu Rz v ľubovoľnej výške vzorky. Spoľahlivosť výsledkov podporuje veľmi vysoký koeficient spoľahlivosti až 90,28%. Podobne rastú aj

hodnoty maximálnej chyby merania, ktoré sú vyjadrené mocninou spojnicou trendu. Táto spojnica trendu dosahuje koeficient spoľahlivosti až 87,15%. Odhady maximálnej chyby sú teda veľmi presné. Naopak odhad minimálnej hodnoty, kde sa počíta aj s chybou je veľmi nepresné, kde hodnota spoľahlivosti z nameraných a vypočítaných dát vychádza len 2,21%.

Štatisticky som spracoval i hodnoty v jednotlivých výškach po meraní optickým mikroskopom. Vypočítané hodnoty som zaznamenal do tabuliek 18 až 20. Postup výpočtov bol rovnaký ako v prípade pre celú vzorku, s tým že počet meraní $n = 3$.

Tabuľka 18 – Štatistické spracovanie vzoriek s výškou 25 mm (uvedené hodnoty sú v μm)

Výška vzorky 25 mm						
Ozn. vzorky/miesto merania	A	B	C	A	B	C
Typ meranej drsnosti	Ra			Rz		
Vzorka 2	1,589	1,579	1,331	6,930	5,416	4,819
Vzorka 3	1,389	1,757	1,641	5,257	7,349	5,717
Vzorka 4	2,114	2,016	1,950	6,900	6,666	7,116
Aritmetický priemer	1,697	1,784	1,641	6,362	6,477	5,884
Výberová smerodat. odchýlka	0,187	0,110	0,155	0,479	0,490	0,579
Smerodatná odchýlka rozptylu	0,108	0,063	0,089	0,276	0,283	0,334
Neistota typu A	0,245	0,143	0,202	0,625	0,640	0,756

Tabuľka 19 – Štatistické spracovanie vzoriek s výškou 15 mm (uvedené hodnoty sú v μm)

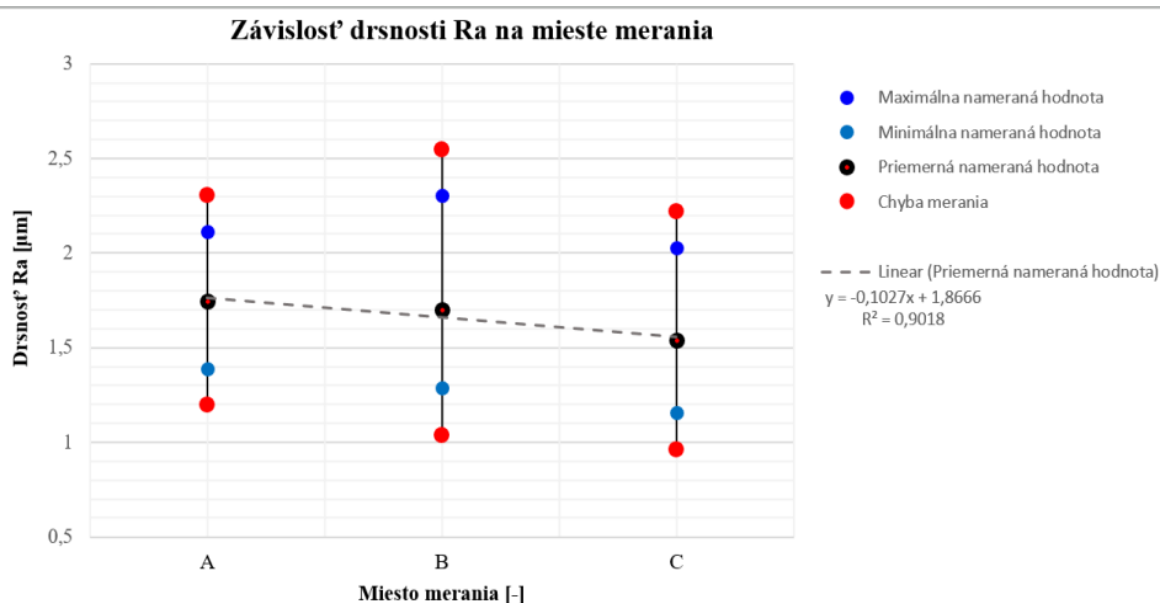
Výška vzorky 15 mm						
Ozn. vzorky/miesto merania	A	B	C	A	B	C
Typ meranej drsnosti	Ra			Rz		
Vzorka 5	1,422	1,287	1,446	4,901	5,366	4,721
Vzorka 6	1,871	1,340	1,425	7,031	4,689	6,683
Vzorka 7	1,935	2,305	2,030	7,105	6,699	7,141
Aritmetický priemer	1,743	1,644	1,634	6,346	5,584667	6,181667
Výberová smerodat. odchýlka	0,140	0,287	0,172	0,626	0,511	0,643
Smerodatná odchýlka rozptylu	0,081	0,165	0,099	0,361	0,295	0,371
Neistota typu A	0,183	0,374	0,224	0,817	0,668	0,839

Tabuľka 20 – Štatistické spracovanie vzoriek s výškou 10 mm (uvedené hodnoty sú v μm)

Výška vzorky 10 mm						
Ozn. vzorky/miesto merania	A	B	C	A	B	C
Typ meranej drsnosti	Ra			Rz		
Vzorka 8	1,970	1,843	1,596	7,688	5,721	5,477
Vzorka 9	1,870	1,890	1,156	6,697	6,620	5,129
Vzorka 10	1,539	1,286	1,275	5,518	5,531	5,920
Aritmetický priemer	1,793	1,673	1,342	6,634	5,957333	5,508667
Výberová smerodat. odchýlka	0,113	0,168	0,114	0,543	0,291	0,198
Smerodatná odchýlka rozptylu	0,065	0,097	0,066	0,314	0,168	0,114
Neistota typu A	0,147	0,219	0,149	0,709	0,380	0,259

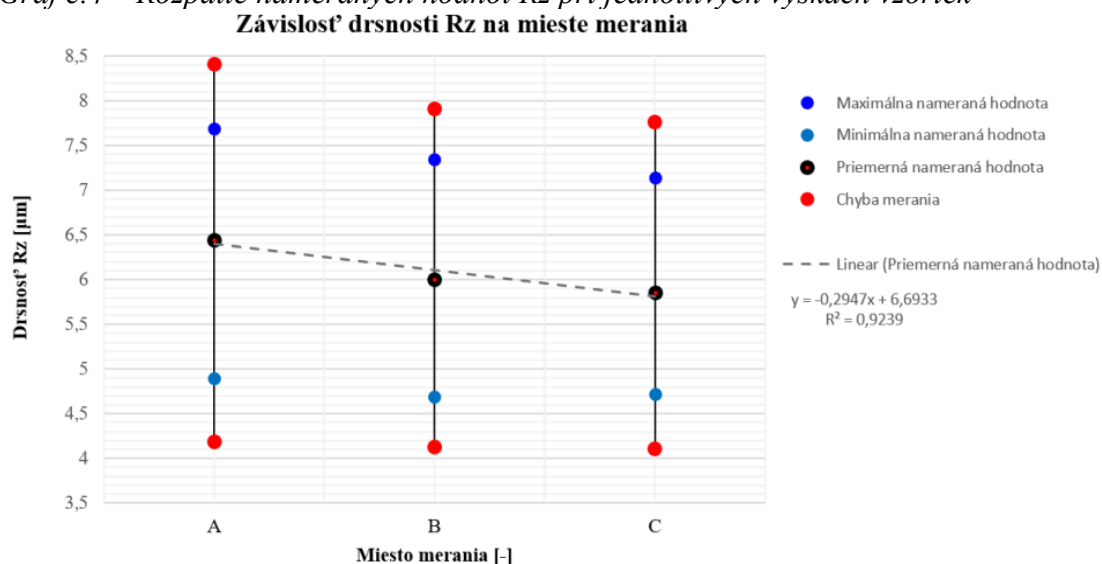
Z nameraných hodnôt som vytvoril grafy, ktoré znázorňujú správanie sa nameraných hodnôt drsností Ra a Rz v mieste merania A, B, C. Grafy zobrazujú maximálnu nameranú hodnotu, minimálnu nameranú hodnotu, priemernú nameranú hodnotu a taktiež aj chybu merania od maximálnej a minimálnej hodnoty. Súčasťou grafov je aj spojnica trendu.

Graf č.3 – Rozpätie nameraných hodnôt Ra pri jednotlivých výškach vzoriek



Z grafu č.3 je vidieť, že priemerná nameraná hodnota drsnosti Ra klesá od miesta A po miesto C. Túto skutočnosť zobrazuje aj lineárna spojnica trendu s koeficientom spoľahlivosti $R^2 = 90,18\%$. To znamená že priemerná drsnosť Ra je na začiatku rezu technológiou WEDM horšia a postupne sa zlepšuje. Zároveň je v grafe vidieť, že ani v porovnaní nameraných hodnôt v jednotlivých miestach aj s chybou merania neprekračujú hodnotu, ktorú predpisuje norma ČSN 02 2507, t.j. $R_a = 3,2 \mu\text{m}$.

Graf č.4 – Rozpätie nameraných hodnôt Rz pri jednotlivých výškach vzoriek



Graf č.4 ukazuje závislosť drsnosti Rz na mieste merania. Priemerná hodnota na mieste merania A je podobne, ako v grafe č.3 väčšia oproti miestu merania C. Táto skutočnosť z výsledkov merania ukazuje, že podobne ako drsnosť Ra, tak aj drsnosť Rz je na začiatku rezania WEDM väčšia a postupne sa kvalita povrchu zlepšuje. Graf obsahuje aj lineárnu spojnicu trendu priemerných nameraných hodnôt s veľmi vysokým koeficientom spoľahlivosti až $R^2 = 92,39 \%$.

4. Záver

V tejto bakalárskej práci bol zisťovaný povrch protikusu perodrážky ocele EN 1.4301, ktorý bol obrobený nekonvenčnou metódou obrábania WEDM. Cieľom bolo laboratórne zmerať povrch v 2D a 3D priestore. Ďalšou prioritou práce bolo z nameraných hodnôt zistiť správanie sa drsnosti pri meniacej sa výške meraného vzorku a závislosť drsnosti na mieste merania.

Prácu sa rozdeľuje do dvoch častí. V prvej časti práce som bližšie priblížil teoretické poznatky o technológii EDM, resp. WEDM. Ďalej som priblížil parametre, ktoré definujú drsnosť povrchu.

Druhá časť práce, praktická časť, detailne rozoberá rezaný materiál – jeho chemické zloženie, mechanické vlastnosti a použitie. Ďalej praktická časť pokračuje popisom použitých pracovných podmienok na výrobu perodrážky technológiou WEDM. Hlavnou časťou je však samotné meranie deviatich vzoriek, ktoré boli rozdelené rozmerovo do trojíc. Meranie som uskutočnil v laboratórnych podmienkach, kde boli zistené hodnoty akosti povrchu Ra a Rz, 2D i 3D meraním. Zistené hodnoty neprekročili ani v jednom meraní drsnosť $Ra = 3,2 \mu\text{m}$, ktorú predpisuje norma ČSN 01 2507. Namerané hodnoty som mohol následne štatisticky spracovať, kde som určil neistotu merania typu A. Výsledky meraní som aj graficky spracoval.

Grafické výsledky merania ukázali, že výška vzorky má vplyv na drsnosť Ra a Rz. V oboch prípadoch rastie priemerná drsnosť spolu s rastúcou výškou vzorky. Rovnice, ktoré popisujú rast danej priemernej drsnosti sú zobrazené v grafe č.1, resp. grafe č.2. Skúmaním závislosti drsnosti Ra a Rz na mieste merania bolo preukázané, že priemerná nameraná drsnosť Ra klesá z miesta merania A po miesto merania C, čo zobrazuje graf č.3, resp. graf č.4. V grafoch je zobrazená aj rovnica tohto klesajúceho trendu. V prípade meraného miesta B v grafe č.3, bola zistená väčšia neistota merania a z toho vyplýva, že toto miesto vykazuje väčšie hodnoty drsností. Je to zapríčinené najmä tým, že v tomto mieste bolo počas rezania technológiou WEDM najmenšie množstvo dielektrika a to ovplyvnilo rezací drôt.

Touto cestou by som sa veľmi rád poďakoval pánovi Ing. Františkovi Špalekovi za odborné rady a vedenie pri tvorbe tejto bakalárske práce. Ďalej by som sa chcel poďakovať pánovi doc. Ing. Marekovi Sadílkovi, PhD., ktorý umožnil prístup k optickému mikroskopu Alicona InfiniteFocus G5 na VŠB-TU a pomáhal zvládnuť jeho obsluhu.

Použitá literatura

- 1 SADÍLEK, Marek. Nekonvenční metody obrábění I. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- 2 MIČIETOVÁ Anna, Ildikó MAŇKOVÁ a Karol VELÍŠEK. Top trendy v obrábění. Žilina: Media/ST, 2007, 232 s. ISBN 978-80-968954-7-2.
- 3 Vigner, Z.; Prikryl, Z.: Obrábění – technický průvodce SNTL Praha 1987, 1. vyd.
- 4 König, W.; Dauw, D.F.; Levy, G.; Panten, U.: EDM – Future Step towards the Machining of Ceramics Annals of the CIRP Vol.37/2/1998, pp. 623-631
- 5 Barcal, J.: Nekonvenční metody obrábění. Ediční středisko ČVUT, Praha 1989
- 6 König, W., Klocke, F.: Fertigungsverfahren – Abtragen und Generieren, 3. Auflage, Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York 1997
- 7 Spur, G., Stöferle, T.: Handbuch der Fertigungstechnik, Band 4/1, Abtragen, Beschichten, Carl Hanser Verlag München Wien 1987
- 8 Kocman, Karel. Technologické procesy obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2
- 9 Nerezová ocel. *INOXspol.cz* [online]. 2019, 2019 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
- 10 Značení oceli. Ferona [online]. FERONA, 2017 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/znaceni-oceli/>
- 11 Elektroerozivna drôtová rezačka. *Chmer* [online]. CHMER EDM, 2014, 2014 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <http://www.chmer.com/products-view.php?id=2>
- 12 Alicona: Focus variation [online]. Alicona, 2017, 2017(English edition 7) [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: http://www.lnccorp.com/wp-content/uploads/2017/11/Alicona_FOCUSvariation_magazine_2017_EN.pdf
- 13 Drsnoměry: Měření jakosti povrchu. *Mitutoyo* [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2609_Mitutoyo_Drsnomery.pdf
- 14 Surf test SJ-400. *Www.mitutoyo.com* [online]. USA: Mitutoyo America Corporation, Aurora IL, 2011, Január 2011 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: https://www.mitutoyo.com/Images/003/308/2013_SJ-400.pdf

15 Rezacie drôty. ELERO [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z:
http://www.elero.sk/storage/sk_katalogy/1._Rezacie_droty.pdf

16 TICHÁ, Šárka. 2004. STROJÍRENSKÁ METROLOGIE: část 1. Ostrava. Dostupné také z:
<http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>. Skripta. Vysoká škola báňská –
Technická univerzita Ostrava.

17 ČSN EN ISO 4287 ZMĚNA A1 (01 4450). Geometrické požadavky na výrobky (GPS) -
Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha:
Český normalizační institut, 1999.

18 VanDijk, F.S.; Dutré, W.L.: Heat Conduction Model for the Calculation of the Volume of
Molten Metal in Electric Discharge, J. Phys. D Appl. Phys. Vol 7 1974 pp 899909